

OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALGODÓN FIBRA, MEDIANTE UN
MODELO DE REGRESIÓN A PARTIR DE LA CONDICIONES DE ENTRADA
Y DE PROCESO EN LA FASE DE DESMOTE

ALVARO JOSÉ GÓMEZ OSORIO

UNIVERSIDAD DEL NORTE
BARRANQUILLA
2012

OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALGODÓN FIBRA, MEDIANTE UN
MODELO DE REGRESIÓN A PARTIR DE LA CONDICIONES DE ENTRADA
Y DE PROCESO EN LA FASE DE DESMOTE

ALVARO JOSÉ GÓMEZ OSORIO

Trabajo de grado para optar por el título de:

Asesor:
Ingeniero
Marco Enrique Sanjuán Mejía Ph.D.
Associate Professor and CIMM Director.
Mechanical Engineering Departament.
Universidad del Norte

UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISION DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL
BARRANQUILLA
2012

Nota de Aceptación:

Profesor

Profesor

Profesor

DEDICATORIA

A mí dios todopoderoso, dueño de la vida y dador de sabiduría, por haberme permitido llegar hasta este punto y darme salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A Liliana Patricia, mí esposa, por su amor, cariño, comprensión, estímulo constante, paciencia y apoyo incondicional que fueron bases para este nuevo logro en mi vida.

A Liliana Margarita, mi hermosa hija, quien con su sonrisa y alegría me demuestra cada día que vale la pena vivir y que tengo un compromiso de avanzar para brindarle siempre lo mejor, y ser para ella un ejemplo de vida.

A mi hermana Margarita y su esposo Pablo por haber sido los gestores para continuar con mis primeros estudios de educación superior, ya que sin su apoyo en ese momento de mi vida, esta meta alcanzada hoy, no se hubiese cristalizado.

AGRADECIMIENTOS

A las directivas académicas y administrativas de la Universidad de Córdoba que en el 2009 confiaron en mi persona y apoyaron financiera e incondicionalmente mi propuesta de educación postgradual; y en general a toda la Universidad por el soporte institucional dado para la realización y culminación de este trabajo.

Al ingeniero MARCO ENRIQUE SANJUÁN MEJÍA, por su oportuna asesoría y dirección en el trabajo de investigación.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento al compañero de estudio de maestría y de trabajo, ingeniero JORGE MARIO LÓPEZ PEREIRA, por su importante aporte y participación activa en el desarrollo de esta tesis; debo destacar, por encima de todo, su disponibilidad y paciencia, no cabe duda que su participación enriqueció el trabajo realizado y, además, ha significado el surgimiento de una sólida amistad.

También agradezco a los docentes del programa por los conocimientos compartidos y enseñados para mi desarrollo profesional.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

CONTENIDO

1. FUNDAMENTOS PRELIMINARES DE LA INVESTIGACIÓN	13
1.1. Planteamiento del problema	14
1.2. Objetivo general.....	15
1.3. Objetivos específicos.....	15
1.4. Justificación.....	16
1.5. Alcances y limitaciones de la investigación	16
2. GENERALIDADES DEL ALGODÓN	18
2.1. Grupos de algodones de importancia comercial.	18
2.1.1. <i>Gossypium hirsutum</i>	18
2.1.2. <i>Gossypium barbadense</i>	19
2.1.3. <i>Gossypium herbaceum</i> y <i>G. arboreum</i>	19
2.2. Recolección de algodón en campo.....	19
2.2.1. Recolección manual.	19
2.2.2. Recolección mecánica.....	19
2.3. Producción mundial de algodón semilla.....	20
2.4. Producción de algodón semilla en Colombia.....	20
2.5. Producción de algodón semilla en Córdoba.	22
2.6. Rendimientos en el algodón.....	23
2.7. Rendimientos comparativos en la producción de algodón semilla.	24
2.8. Productos, subproductos y usos del algodón	24
3. ESTADO DEL ARTE.....	27
3.1. Variables que afectan el rendimiento en fibra.....	34
3.1.1. Nivel de materia extraña presente en el lote.....	34
3.1.2. Nivel de humedad con el que el lote entra al proceso.	35
3.1.3. Nivel de temperatura durante el proceso.	37
3.1.4. Número de limpia fibras aplicado durante el proceso.	38
3.2. Variables que afectan la calidad	38

3.2.1. Longitud de la fibra.	39
3.2.2. Uniformidad de la longitud.....	39
3.2.3. Resistencia de la fibra	40
3.2.4. Micronaire y madurez	40
3.2.5. Color	41
3.2.6. Impureza.....	42
3.2.7. Grado de hoja.....	42
3.2.8. Materias extrañas	43
3.3. El rendimiento y la calidad del algodón fibra	43
3.4. Factores que determinan el precio base del algodón fibra.	44
3.5. Asignación de grados de clasificación.	44
3.6. Contribución de los atributos de calidad en el precio.....	45
3.7. Maquinaria de desmote.....	46
3.7.1. Desmotadora de sierra	46
3.7.2. Desmotadora de rodillos.....	47
3.8. Procesos de desmote de algodón.	48
3.9. Descripción general del proceso de desmote	49
3.10. Proceso de desmote en la planta	50
3.11. Políticas internas de desmote en la planta.	52
3.12. Optimización.	52
3.13. El problema de optimización.....	54
3.14. Optimización multiobjetivo.	55
3.15. Conjunto de Pareto.....	56
3.16. Dominancia de Pareto.....	57
3.17. Óptimos de Pareto.....	57
3.18. Conjunto Óptimo de Pareto.....	57
3.19. Frontera de Pareto.....	57
3.20. Metaheurísticas.....	58
3.21. Clases de metaheurística.....	59
3.21.1. Metaheurística de Relajación.	59
3.21.2. Metaheurísticas Constructivas.	60
3.21.3. Metaheurísticas de Búsqueda.	60
3.21.4. Metaheurísticas Evolutivas.	61

3.21.5.	Metaheurísticas de descomposición.	61
3.21.6.	Metaheurística de Memoria a Largo Plazo.	62
3.21.7.	Metaheurística simulado recocido.	62
3.21.8.	Enjambre de partícula PSO.	62
3.21.9.	Metaheurística híbrida.	65
3.21.10.	Ajuste de parámetros del PSO híbrido.	65
3.22.	Prueba de Shapiro & Wilk.	66
3.23.	Prueba de Durbin-Watson.	67
3.24.	Gráficos Cuantil-Cuantil.	67
3.25.	Variables Dummy.	67
4.	DISEÑO METODOLOGICO.	69
4.1.	Propuesta de modelo de regresión.	69
4.2.	Variables de diseño.	71
4.2.1.	Variedad (OPAL, DP164 y M123).	71
4.2.2.	Humedad (HE).	72
4.2.3.	Materia Extraña (MEA, MEB y MEC).	72
4.2.4.	Aplicación de limpia-fibras (NLF).	72
4.2.5.	Temperatura de secado durante el proceso (TP)	72
4.3.	Variable repuesta rendimiento (rend).	73
4.4.	Proceso de toma de datos.	73
4.5.	Características del modelo a fijar.	74
4.6.	Procedimiento de la metaheurística híbrida.	75
4.7.	Parámetros y ajustes al modelo.	77
5.	RESULTADOS.	79
5.1.	Frontera eficiente de Pareto.	80
5.2.	Modelo de regresión seleccionado.	81
5.3.	Rendimiento y condiciones óptimas de operación bajo el modelo ideal seleccionado.	87
5.4.	Análisis de los efectos por variables.	88
5.4.1.	Efectos del nivel de humedad del lote.	89
5.4.2.	Efectos de la temperatura de proceso (TP) en el rendimiento.	90
5.4.3.	Efecto de la aplicación de limpia fibras.	91
	CONCLUSIONES.	94

TRABAJOS FUTUROS.....	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
ENLACES	99
Anexo 1. COMPONENTES DE LOS MODELOS DEL FRENT DE PARETO.....	101
Anexo 2. ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES ESTANDARIZADOS MODELOS DEL FRENT DE PARETO.....	127
Anexo 3. RENDIMIENTO Y CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN BAJO LOS MODELOS DEL FRENT DE PARETO.	134
Anexo 4. PARÁMETROS POR VARIABLES Y POR MODELO DEL FRENT DE PARETO.	137

LISTA DE TABLAS

pág.

TABLA 1. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ALGODÓN (MILLONES DE TONELADAS MÉTRICAS) .	20
TABLA 2. PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE ALGODÓN EN COLOMBIA	21
TABLA 3. PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DEL ALGODÓN EN CÓRDOBA	23
TABLA 4. RENDIMIENTO EN FIBRA DE ACUERDO A LA VARIEDAD	32
TABLA 5. CONTENIDO MEDIO DE IMPUREZAS UPLAND AMERICANO	35
TABLA 6. IMPACTO DE LA TEMPERATURA DE SECADO EN EL RENDIMIENTO EN FIBRA	38
TABLA 7. ÍNDICE DE UNIFORMIDAD DE LA LONGITUD HVI (%)	39
TABLA 8. RESISTENCIA DE HVI (GRAMOS POR TEX)	40
TABLA 9. RELACIÓN DE MEDICIONES DE IMPUREZA	42
TABLA 10. DIFERENCIALES PARA LOS GRADOS DE CLASIFICACIÓN DEL ALGODÓN	44
TABLA 11. DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	63
TABLA 12. FACTORES Y SUS NIVELES	74
TABLA 13. SEUDOCÓDIGO.....	76
TABLA 14. VARIABLES DEL MODELO Y SUS CARACTERÍSTICAS	77
TABLA 15. VARIABLES DEL MODELO	77
TABLA 16. MODELOS BÁSICOS	79
TABLA 17. MODELOS FRENTE DE PARETO	80
TABLA 18. RENDIMIENTOS ESTIMADOS MODELO IDEAL	88
TABLA 19. EFECTO DE LA HUMEDAD DEL LOTE	89
TABLA 20. EFECTO DE LA TP EN EL RENDIMIENTO	91
TABLA 21 EFECTO DE LIMPIA FIBRAS APLICADOS	92

LISTA DE ILUSTRACIONES

pág.

ILUSTRACIÓN 1. ALGODÓN.....	18
ILUSTRACIÓN 2. RENDIMIENTOS COMPARATIVOS.....	24
ILUSTRACIÓN 3. USOS DEL ALGODÓN.....	25
ILUSTRACIÓN 4. PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS DEL ALGODÓN SEMILLA	26
ILUSTRACIÓN 5. HUMEDAD Y DETERIORO DE LA FIBRA	36
ILUSTRACIÓN 6. PÉRDIDA DE PESO DE LA FIBRA POR CADA LIMPIA FIBRAS UTILIZADO ...	38
ILUSTRACIÓN 7. RELACIÓN DE LECTURAS MICRONAIRE A VALOR DE MERCADO	41
ILUSTRACIÓN 8. CONTRIBUCIÓN DE LOS ATRIBUTOS DE CALIDAD.....	45
ILUSTRACIÓN 9. DESMOTADORA DE SIERRA.....	47
ILUSTRACIÓN 10. DESMOTADORA DE RODILLOS	48
ILUSTRACIÓN 11. ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE DESMOTE	50
ILUSTRACIÓN 12. FRONTERA DE PARETO	58
ILUSTRACIÓN 13. FRONTERA EFICIENTE DE PARETO	80
ILUSTRACIÓN 14. GRAFICA DE SECUENCIA RESIDUAL ESTANDARIZADOS	82
ILUSTRACIÓN 15. GRÁFICO DE PROBABILIDAD NORMAL RESIDUALES ESTANDARIZADOS	82

RESUMEN

La presente investigación, tiene como objetivo modelar el rendimiento del algodón semilla medido mediante el porcentaje de algodón fibra obtenido en el proceso de desmote, en función a las condiciones y factores inherentes al lote de algodón semilla a procesar y a las aplicadas durante el proceso de desmote, mediante el desarrollo de una investigación no experimental de tipo Transeccional Correlacional dado que las variables objetos de análisis no han sido manipuladas.

Para ajustar el modelo que optimiza el rendimiento del algodón semilla en función del grado de humedad con que entra el lote al proceso, la cantidad de material extraño contenida en el lote, la variedad del algodón, la temperatura aplicada durante el proceso, el número de limpia fibras aplicados, se diseñó, programo y aplico una metaheurística híbrida entre un simulado recocido simulado (SA) y una enjambre de partículas (PSO).

Encontrado el modelo, que maximiza el rendimiento se implementa el software GAMS (General Algebraic Modeling System), para encontrar el rendimiento óptimo esperado y las condiciones del lote que entra al proceso y las aplicadas durante el procesos de desmote que arrojan este rendimiento de tal manera que se optimicen los márgenes de productividad tanto para agricultores como empresa desmotadora.

1. FUNDAMENTOS PRELIMINARES DE LA INVESTIGACIÓN

En la medida que la globalización económica e internacionalización de los mercados se consolida, surge la necesidad en las empresas industriales y/o de servicio, de mantenerse a la vanguardia en estos entornos altamente competitivos y exigentes, en el que la eficiencia y el desempeño en todas la facetas del proceso productivo se hace condición necesaria para la subsistencia de las empresas y lograr resultados óptimos en términos de rentabilidad, ingresos y crearle valor al patrimonio de los accionistas.

Uno de los aspectos que debe tratar con sumo cuidado las desmotadoras en el departamento de Córdoba, es el de prestarle al cultivador de algodón y/o usuario de los servicios de desmote, procesos eficientes, que le aseguren a ambas, obtener altos rendimientos en el algodón fibra en el proceso de desmote y la desmotadoras logren desarrollar procesos altamente productivos.

Para el logro de los acometidos anteriores, se planteó en el presente trabajo la determinación de un modelo de regresión, con el fin de medir la incidencia de las condiciones del algodón semilla que entran al procesos de desmote y las condiciones de operación aplicadas al procesos, con el objetivo de optimizar la toma de decisiones del técnico de desmote, al momento de definir las condiciones de operación para un lote de algodón con sus características específicas de entrada. Los factores o variables analizadas en el lote que entra al proceso de desmote fueron: la variedad del lote, el nivel de material extraño (suciedad) presente en el lote, el nivel de humedad con el que el lote entra al proceso, el nivel de temperatura aplicada durante el proceso y el número de limpia fibras aplicado al lote. Se seleccionó como variable repuesta el porcentaje de rendimiento, medido como la relación entre la cantidad de algodón semilla que entra al proceso y la cantidad de algodón fibra resultante después del proceso de desmote.

Para obtener el modelo de regresión, y a partir de esté optimizar el rendimiento y las condiciones para cada nivel de rendimiento se analizaron los diferentes factores que puedan afectar el rendimiento, se tomaron datos de 707 lotes de algodón semilla desmotados durante la cosecha 2009-2010, considerando un total de 9 variables, seis variables binarias y tres cuantitativas. Las variables binarias son tres correspondientes a la variedad (DP164, OPAL y M123), tres correspondiente a material extraño en sus niveles (MEA, MEB y MEC), Los factores cuantitativos considerados fueron: Humedad de entrada en los niveles

|

(12, 14, 16, 18 y 20); Número de limpia fibras aplicados (0, 3, 4, 5 y 6) y Temperatura de proceso (30, 50, 60, 80, 110, 130 y 160)

1.1. Planteamiento del problema

La cadena algodón, tiene como primer eslabón el cultivo seguido del desmote, esté es el primer eslabón industrial de la cadena [1]. La fibra y la semilla son los dos principales productos de este proceso, materias prima de la industria textil y el sector aceitero respectivamente.

Diferentes estudios realizados al proceso de desmote han indicado que existen un gran número de variables y factores inherentes a las condiciones del lote de algodón semilla que entra al procesos de desmote que afectan el rendimiento en fibra, tales como la variedad, el nivel de materia extraña, el porcentaje de humedad con que llega el lote a la desmotadora, el tipo de recolección manual o mecánica, entre otras y condiciones inherentes al proceso de desmote como el equipo donde se desmota, la aplicación de agua durante el procesos de desmote, número de limpia fibras aplicados y temperatura de proceso. Adicionalmente se detectó en la desmotadora CAS, al igual que en toda las desmotadoras del Departamento que el técnico encargado de decidir las condiciones bajos las cuales será desmotado un lote determinado no posee unos estándares de proceso bajo los cuales y dependiendo las condiciones de entrada del lote será procesado, la decisión en cuanto a las condiciones de operación que le serán aplicada se hacen solo por la experiencia, sin ningún fundamento técnico y lógico que garanticen obtener altos índices de productividad en el procesos y rendimientos para el agricultor, estos elementos en conjunto están afectando tanto la productividad de la desmotadora como el rendimiento en fibra esperado por el agricultor, puesto que se puede estar operando la maquina desmotadora bajos condiciones extremas sin necesidad de hacerlo, como altas temperaturas de proceso o realizar operación de extrema limpieza.

Según informe presentado por el Gerente de Calidad de Textiles Fabricato Tejicondor S.A, y que son fundamental para la presente investigación los principales problemas detectados en la fibra de algodón, son:

- Rotura de fibra: se pierde longitud y se incrementa el contenido de fibras cortas.
- Neps: mal desmotado genera motas (neps) en el algodón, difíciles de eliminar en el proceso industrial.
- Contaminación: hemos encontrado todo tipo de contaminantes, inclusive piezas metálicas que creemos son de la máquina.

- Revoltura de lotes: pacas con fibras de características muy diferentes en su contenido.
- Semilla: por alguna razón, llegan pacas llenas de semilla, como si hubieran dejado pasar el material sin despepitar
- Suciedad: al momento de limpiar y lubricar la máquina, dejan pasar toda la suciedad y aceites a la paca
- Contenido de humedad: es tan malo trabajar con fibra seca como trabajar con fibra húmeda, es preciso controlar este factor celosamente
- Pérdida de resistencia y elongación: un desmotado agresivo golpea la fibra innecesariamente haciendo que sus características mecánicas se reduzcan.
- Pintura: en ocasiones la pintura que utilizan para identificar la paca penetra profundamente y no se puede eliminar con facilidad

1.2. Objetivo general.

Optimizar el rendimiento en el algodón fibra obtenido en la fase de desmote, mediante un modelo de regresión, a partir de las condiciones con que entra el lote y las que le sean aplicadas durante la fase de desmote, con el fin de que la desmotadora eleve sus niveles de productividad y el agricultor obtenga óptimos rendimientos.

Mediante la determinación de un modelo de regresión, identificar las condiciones de entrada y de operación del proceso de desmote que optimizan el rendimiento en el algodón fibra y bajo las cuales la desmotadora elevaría sus niveles de productividad en el procesos de desmote.

1.3. Objetivos específicos.

1. Realizar un diagnóstico de las condiciones previas al desmote y de las actividades realizadas durante el proceso de desmote, para determinar las posibles variables que pueden afectar el rendimiento de la fibra del algodón.
2. Determinar los parámetros óptimos de entrada del lote bajo los cuales se obtendrían algodones acordes con los estándares de rendimiento establecidos por los productores de la semilla.
3. Estudiar las técnicas metaheurística utilizadas para modelar el comportamiento de una variable regresora continua, dependiente de un conjunto variables predictivas de tipo continuas y binarias.

4. Determinar las condiciones óptimas bajo las cuales se debe operar el proceso de desmote para obtener rendimientos óptimos, considerando las variables objetos de análisis en la presente investigación

1.4. Justificación

La calidad y el rendimiento de la fibra de algodón son dos términos que tienen igual importancia dentro de la cadena algodón, la industria textil por un lado exige fibras de alta calidad, para sus procesos de hilandería, el agricultor por otra parte prefiere obtener altos rendimientos como primera instancia dejando la calidad en un segundo plano, sabiendo de antemano que la calidad de la fibra es un factor trascendental ya que el precio final que el agricultor obtiene por tonelada depende en última instancia de los indicadores de calidad reflejados en los laboratorios a través de las pruebas HVI, pruebas realizadas a cada una de las pacas extraídas en el proceso de desmote.

Esta investigación permitirá definir las condiciones de operación del proceso de desmote, mediante la determinación de un modelo de regresión lineal, desarrollando una investigación no experimental de tipo Transeccional Correlacional [2], que permitan al agricultor y a la desmotadora obtener altos niveles de rendimiento y productividad, sin descuidar, las condiciones para que la fibra alcance óptimos niveles tecnológico de calidad, medidos en los laboratorios mediante las pruebas HVI.

Es importante resaltar, que los estudios de este tipo son bastante escasos en Colombia y Latinoamérica, la mayoría de estos se centran en analizar las condiciones del cultivo y características de la semilla con la que se obtendrían altos rendimientos medidos a través del algodón semilla recolectado por hectárea cultivada o rendimiento en campo; a diferencia de presente investigación, la cual busca determinar un modelo matemático que permita encontrar las condiciones óptimas del lote de entrada y del proceso para obtener el máximo rendimiento en fibra.

1.5. Alcances y limitaciones de la investigación

El presente trabajo se desarrolló en la COMPAÑÍA AGROINDUSTRIAL DEL SINU S.A, "CAS" ubicada en el municipio de Cereté, Departamento de Córdoba, durante la temporada algodонера 2009-2010.

Una de las limitaciones de la presente investigación es que los niveles de temperaturas aplicadas, y la aplicación de limpia fibras durante el procesos de

desmote usados en la presente investigación, fueron los aplicados por el técnico de desmote de acuerdo a su experiencia y resultados obtenidos en lotes bajo condiciones similares, igualmente las tres variedades seleccionadas para conseguir los objetivos planteados para el presente trabajo fueron las variedades que presentaron el mayor número de lotes desmotado, es decir que las conclusiones a que se lleguen solo aplican para estas tres variedades, OPAL, M123 y DP164, puesto que para otras variedades se lograr niveles diferentes de rendimientos.

Como resultado final, se pretende obtener un modelo de regresión que permita optimizar el rendimiento en el algodón fibra obtenido en el proceso de desmote, e indicar las condiciones bajo las cuales se obtendrían los máximos niveles de rendimiento, es decir determinar la variedad, el nivel de humedad y el nivel de suciedad del lote que entra al proceso y la temperatura y cantidad de limpia fibras del equipo desmotador aplicados en el proceso de desmote.

2. GENERALIDADES DEL ALGODÓN

El algodón, tiene como nombre científico *Gossypium spp.* Hace parte de la Clase *Angiosperma*, del orden de las *Malvales*, Familia *Malvaceae*, Género *Gossypium* y Especie *spp.*[3],[4]. La planta de algodón posee un tallo erecto y con ramificación regularmente uniformes. Existen dos tipos de ramas, las vegetativas y las fructíferas. Las hojas son pecioladas, de un color verde intenso, grandes, con los márgenes lobulados, y están provistas de brácteas. Las flores del algodónero son grandes, solitarias y penduladas, el cáliz de la flor está protegido por tres brácteas. La corola está formada por un haz de estambres que rodean el pistilo. Se trata de una planta autógama. El fruto es una cápsula en forma ovoide con un peso de 4 a 10 gramos, ver ilustración 1. El fruto es de color verde durante su desarrollo y oscuro en el proceso de maduración [3].

Ilustración 1. Algodón



Fuente: Infoagro (2005)

2.1. Grupos de algodones de importancia comercial.

Botánicamente, a nivel mundial existen tres grupos principales de importancia comercial [5].

2.1.1. *Gossypium hirsutum*.

Es nativo de México y América Central y ha sido desarrollado para uso extensivo en los Estados Unidos, representando más del 95% de la producción norteamericana [5]. De esta especie se obtiene una fibra corta llamada Upland, la

|

cual actualmente proporciona casi el 70 % de la producción mundial[6]. Este grupo es conocido en los Estados Unidos como algodón Upland Americano, y varía en longitud desde alrededor de 7/8" (22,2 mm) hasta 1 5/16" (33,3 mm). Esta es la variedad de algodón más cultivada en Colombia.

2.1.2. *Gossypium barbadense*.

Hace parte de un segundo grupo botánico que cierra el balance de la producción norteamericana, es de primitivo origen en América del Sur. Variando en longitud desde 1 1/4" (31,75 mm) hasta 1 9/16" (39,7 mm), es conocido en los Estados Unidos como Pima Americano, pero también es comúnmente referido como algodón de Fibra Extra Larga (Extra Long Staple ó ELS), este algodón es de gran calidad y de él se extraen varios tipos de algodón, como el Giza, Pima, Tangüis y Sea Island [3].

2.1.3. *Gossypium herbaceum* y *G. arboreum*.

Pertenece al tercer grupo botánico y comprende algodones de longitud más corta, 1/2" (12,7 mm) a 1" (25,4 mm), que son nativos de la India y Asia del Este[5].

2.2. Recolección de algodón en campo

Una vez que la mota de algodón ha llegado a su periodo de maduración, es decir cuando está totalmente abierta [7], la siguiente etapa es la recolección, esta actividad se realiza de forma manual y mecánica.

2.2.1. Recolección manual.

La forma de recolección manual es muy sencilla consiste en recolectar el algodón de la planta introduciéndolo en unos sacos hasta alcanzar un peso próximo de los mismos de 25 kg. Los sacos se cargan en remolques, donde después son llevados a la fábrica o factoría[3].

La recolección manual es de mayor calidad ya que el algodón recolectado es más limpio. Pero el inconveniente radica en la mano de obra que es más costosa que empleando maquinaria [4].

Los lotes de algodón objetos de análisis para la presente investigación todos fueron recolectados en forma manual.

2.2.2. Recolección mecánica.

Existen dos tipos de recolección mecánica: la *cosechadora de cápsulas* y la *cosechadora de fibra*.

La *cosechadora de cápsulas* extrae las cápsulas de la planta por un mecanismo de arranque y posteriormente se realiza un mecanismo de limpieza que separa las brácteas de la cápsula de lo que es el algodón en sí. La recogida se efectúa en una sola pasada [3].

La *cosechadora de fibra* realiza la extracción del algodón bruto mediante un "husillo" de acero con el cual arrastra mediante giro las fibras de algodón y hace que se separe por completo de la bráctea. Posteriormente un mecanismo de la cosechadora denominado peines retira las fibras de los husillos o vástagos y las introducen mediante una trompa de aire a la tolva de la maquinaria[4].

2.3. Producción mundial de algodón semilla.

A nivel mundial el algodón es producido en más de 100 países, y que dependiendo de las condiciones geográficas y climáticas del país respectivo, la siembra de algodón gira en torno a las tres variedades descritas en la sección 2, la tabla 1, muestra los 6 principales países productores de algodón a nivel mundial, Colombia actualmente está ocupando el puesto 37, y a nivel del continente americano ocupa el séptimo puesto.

Tabla 1. Producción mundial de algodón (Millones de toneladas métricas)

País	2006/07	2007/08	2008/09
China	7,7	8,1	8,0
India	4,7	5,2	4,9
Estados Unidos	4,7	4,2	2,8
Pakistán	2,2	1,9	2,0
Brasil	1,5	1,6	1,2
Uzbekistán	1,2	1,2	1,0
Resto del Mundo	5,2	4,4	4,1
Total	27,2	26,6	24,0

Fuente: http://es.cottonic.com/MonthlyEconomicLetter_ES.

China es el principal productor mundial de algodón seguido de la india los cuales en la cosecha 2008/2009, produjeron el 33% y 20% respetivamente de la producción mundial

2.4. Producción de algodón semilla en Colombia.

Por su posición geográfica privilegiada en Colombia se desarrollan dos cosechas al año, la primera cosecha es la que se desarrolla en la costa atlántica y en los llanos orientales, que comprende los departamentos de Antioquia, Atlántico,

Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena, Casanare, Meta y Vichada. Que de acuerdo a las condiciones climáticas las siembras se llevan a cabo entre los meses de agosto y octubre y la recolección de la cosecha se hace desde diciembre hasta el mes de marzo del año siguiente. La región del interior que comprende los departamentos del Tolima, Valle del Cauca, Huila y Cundinamarca, las siembras empiezan en marzo y se extienden hasta el mes de abril y la recolección de la cosecha se desarrolla entre julio y agosto del mismo año.

En Colombia actualmente se están cultivando diferentes variedades de algodón de longitud de fibra media y larga, en su mayoría se emplean semillas originarias de América, además se han desarrollado algunas variedades mejoradas basándose en el cruzamiento entre variedades introducidas a Colombia desde países con altos rendimientos y variedades colombianas con cierto grado de productividad, sin embargo, dichas variedades no han sido suficientemente difundidas entre los agricultores y aún se presenta una alta dependencia de la semilla importada.

La tabla 2, muestra el comportamiento del cultivo de algodón en Colombia desde 1997 a 2008, en cuanto a área cosechada, producción y rendimiento (Kg/ha).

Tabla 2. Producción y rendimiento del cultivo de algodón en Colombia

Año	Superficie(ha)	Producción (Ton.)	Rendimiento (Kg/ha)
1997	887.140	1.029.866	1.161
1998	877.880	987.210	1.125
1999	639.690	671.542	1.050
2000	332.090	417.680	1.258
2001	388.043	509.405	1.313
2002	164.731	218.158	1.324
2003	145.723	201.506	1.383
2004	254.913	353.799	1.388
2005	374.578	448.260	1.197
2006	304.397	417.770	1.372
2007	393.005	545.398	1.388
2008	303.383	493.601	1.627
2009	289.785	388.528	1.341

Fuente: SAGPyA y MAGyP, Estimaciones agrícolas

De acuerdo a la tabla anterior, se puede notar como el cultivo de algodón hasta 1999 tuvo su mayor auge debido a los altos precios internacionales, a partir del 2000 el área sembrada ha disminuido en aproximadamente un 50%. En cuanto a la producción (Ton/ha), ha disminuido en un porcentaje que oscila entre un 40% y 45%. El rendimiento (kg/ha), desde el año 2000 en Colombia, ha permanecido estable y no registra incrementos significativos en las última décadas, principalmente porque la mayor parte del área cultivada no recibe riego, sin

|

embargo, según los datos reportados por la FAO, desde 1992 Colombia muestra rendimientos superiores a los mundiales.

Los rendimientos alcanzados en Colombia son iguales a los de Estados Unidos, 2.1Tm./Ha, dicho resultado muestra un avance en competitividad, sin embargo, el techo tecnológico sigue siendo alto y Colombia tiene que recorrer aún un largo camino para alcanzar a los países líderes en rendimientos tales como Israel, con 4,8 Tm./Ha. y Australia, con 4.3 Tm./Ha.

Aunque la producción de algodón nacional tiene rendimientos por encima del promedio mundial e iguales a los de Estados Unidos y los costos de producción son competitivos en relación con los internacionales en particular con respecto a los de Estados Unidos, los indicadores de competitividad señalan que el país no ha logrado conservar su mercado interno. Las importaciones representan un 65% del consumo nacional y paradójicamente provienen en su mayoría de los Estados Unidos, mientras las exportaciones prácticamente han desaparecido.

La industria nacional del algodón se ha destacado por su aporte al empleo y al desarrollo del país, sin embargo, en los últimos años revela un esquema peligroso de desarrollo de la exportación de confecciones sustentado, fundamentalmente, en importaciones crecientes de materias primas tales como hilos y telas; por tanto, aunque el algodón colombiano fue un producto tradicionalmente exportable, que cuenta con dos cosechas anuales frente a la mayoría de países competidores que sólo tienen una y presenta ventajas de clima y ambiente que favorecen la producción de fibra larga y media, la el sector algodonero ha venido perdiendo competitividad en forma progresiva, la producción y el área cultivada se han reducido y los rendimientos han crecido a una tasa muy baja. Dicha situación, ha sido generada por la tendencia a la baja de los precios y la exposición a la competencia internacional en donde los subsidios que otros países otorgan a la producción algodonera afectan directamente los precios y la participación en el mercado de los países menos desarrollados.

2.5. Producción de algodón semilla en Córdoba.

En Córdoba al igual que en todo el territorio nacional, se cultiva algodón del grupo Upland Americano, de aquí que todas las apreciaciones de la fibra se encuentran dentro de los límites de variación de la longitud (22,2 mm – 33,3 mm).

La tabla 3, muestra la superficie cosechada (ha), la producción (Ton/ha) y el rendimiento (kg/ha), que a nivel del departamento de Córdoba se han desarrollados en la última década, de la tablas Nos. 2 y 3. Se concluye que Córdoba en promedio en los últimos 12 años ha representado el 7,4% de la superficie total cosechada en el país.

En el año del 2003 se realizaron análisis del rendimiento del algodón en diferentes países del mundo encantarándose que los rendimientos más altos los presentaron países distintos a los mayores productores; los tres países con la mayor productividad fueron Israel, Australia y Siria, con 4,8Tm/Ha., 4,3Tm/Ha. y 4Tm/Ha., respectivamente, los cuales superan por más de un 50% los rendimientos alcanzados en Colombia. Estados Unidos uno de países desarrollados y mayores productores de algodón presento para ese mismo año un rendimiento de 2,1 (Tm/ha), rendimientos muy similares a los registrados en Córdoba, para los diez años a que hace referencia la tabla No 3.

Tabla 3. Producción y rendimiento del algodón en Córdoba

Año	Superficie (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (kg/ha)
1997	31.106	57.593	1.852
1998	34.606	74.336	2.148
1999	35.990	81.150	2.255
2000	26.820	70.144	2.615
2001	28.921	65.926	2.280
2002	21.623	43.156	1.996
2003	20.218	39.045	1.931
2004	21.953	48.297	2.200
2005	21.554	46.428	2.154
2006	20.852	43.405	2.082
2007	21.873	49.244	2.251
2008	20.065	45.484	2.267

Fuente: <http://www.dnp.gov.co>

2.6. Rendimientos en el algodón

El rendimiento en el algodón se mide desde dos perspectivas el rendimiento en campo y el rendimiento en fibra. El rendimiento o productividad en campo se mide mediante la relación entre la cantidad de algodón semilla recolectada y las hectáreas cultivadas, es decir la relación (Ton/ha) toneladas por hectáreas, éste rendimiento es el que más atención le presta el agricultor en el medio Cordobés [5], [11].

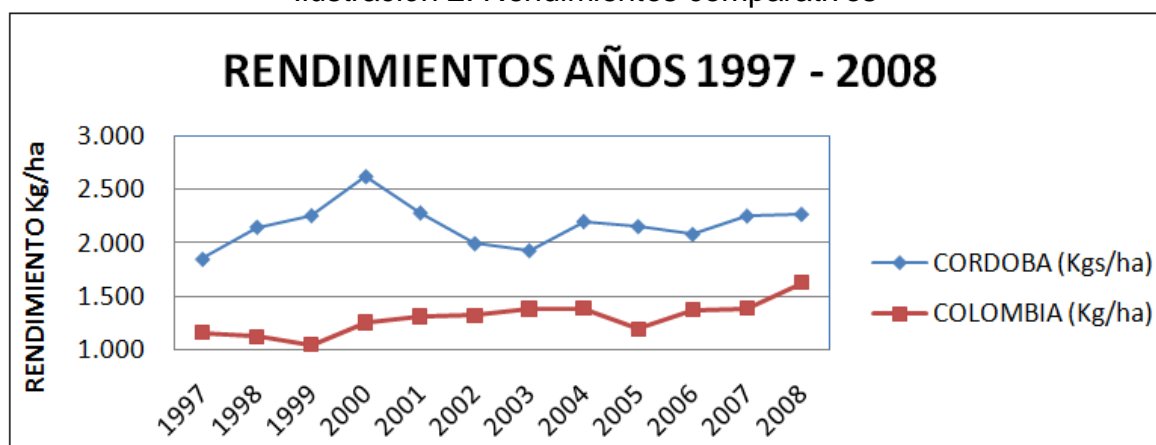
El otro tipo de rendimiento y de mayor peso para cuantificar el beneficio del agricultor es el rendimiento en fibra, dado en porcentaje, el cual ésta, determinado por la relación entre la cantidad de algodón fibra resultante del proceso de desmote y la cantidad de algodón semilla ingresada a la desmotadora, es decir algodón fibra/algodón semilla [4], éste rendimiento es el objeto de análisis para el presente trabajo, que puede ser influenciado por factores o variables como: la variedad de algodón, Material extraño, el equipo desmotador, la aplicación de

limpia fibras, la humedad con la que llega el lote a la desmotadora, la temperatura con que es desmotado, la aplicación de agua durante el proceso de desmote entre otros, por otro lado, como el rendimiento del algodón fibra en campo incide fuertemente en el rendimiento en fibra, se abarcarán ambas perspectivas del rendimiento en el presente marco referencial.

2.7. Rendimientos comparativos en la producción de algodón semilla.

La ilustración 2, muestra un comparativo del comportamiento de los rendimientos en campo obtenidos en el departamento de Córdoba con relación a nivel nacional, Córdoba en los doce años en referencia presentó un rendimiento promedio de 2.2 Ton/ha, mientras que el promedio nacional fue de 1,3 Ton/ha, en promedio Córdoba ha obtenido rendimientos superiores en 65% en los doce años analizados.

Ilustración 2. Rendimientos comparativos

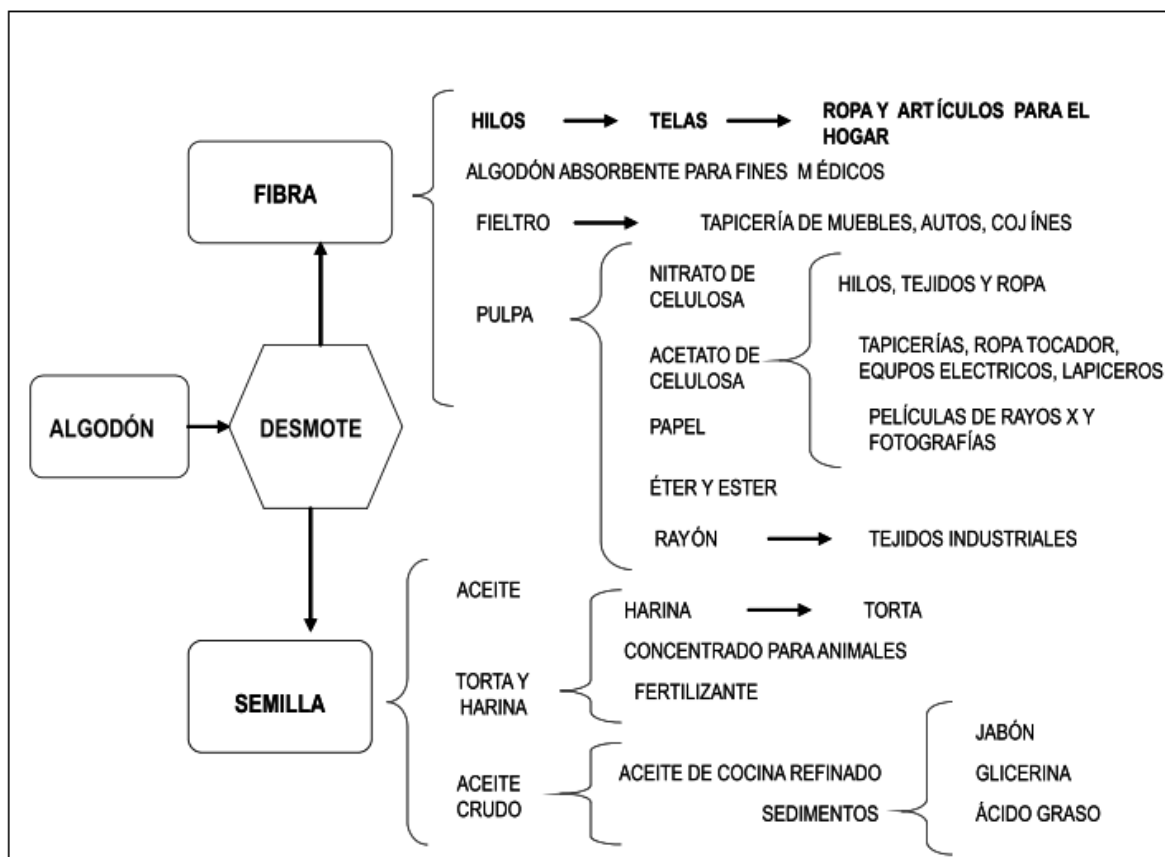


Fuente: Propia

2.8. Productos, subproductos y usos del algodón

El proceso de desmote tiene un producto principal que es el algodón fibra o la fibra de algodón limpia y desmotada, este es el insumo principal de la industria textilera, se utiliza para la producción de hilos y telas. Un subproducto importante que se obtiene del desmote es la semilla de algodón, que es el insumo principal de la industria aceitera. El empleo del aceite de algodón depende de la disponibilidad de la semilla, la cual es comprada a las desmotadoras por la industria aceitera [4].

Ilustración 3. Usos del algodón



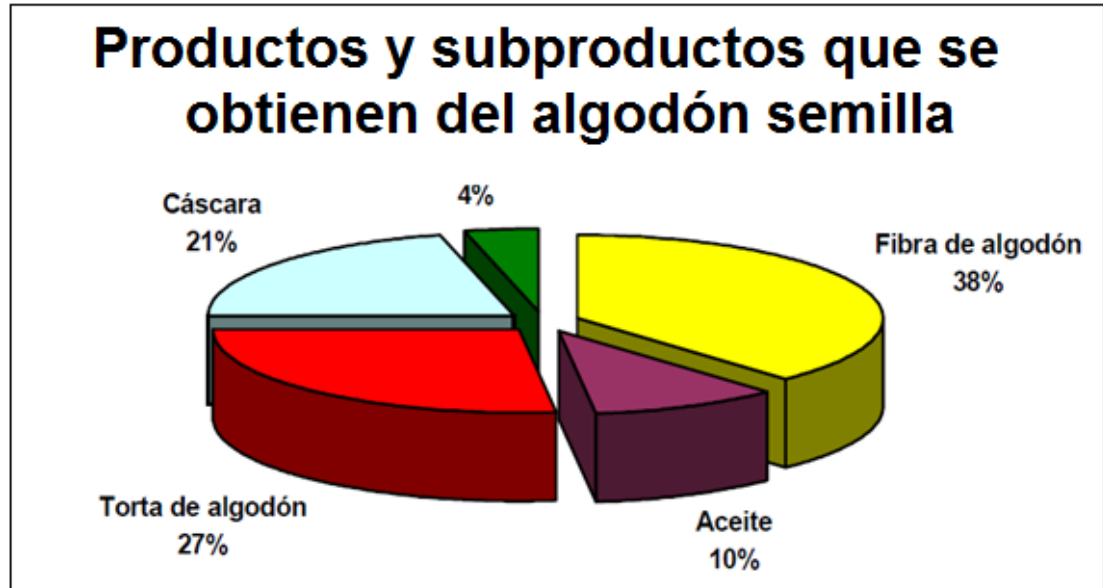
Fuente: Agrocadenas (2006)

Además de la fibra y el aceite de algodón, después del proceso de desmotado también se generan: los linters (filamentos más cortos o pelusa generalmente adherida a la semilla), los cuales se procesan para obtener cuerdas gruesas, o se utilizan como material de relleno o para la fabricación de papel.

La semilla también es empleada por las empresas productoras de alimentos, para la fabricación de torta (pasta de la semilla que se utiliza para la alimentación de ganado) y la cáscara (que se aprovecha como forraje crudo, cama para ganado, abono y combustible), tal como se muestra en la ilustración 4. [3].

Del algodón también se obtienen materias primas para fabricar jabón y pólvora, celulosa para utilizar en cosméticos, fibras para prendas de vestir, combustible para cohetes y recientemente se comprobó que el papel moneda del Euro está confeccionado íntegramente con algodón, también el dólar Estadounidense, en sus versiones más modernas, están confeccionados con esta fibra (Wiese, 2004).

Ilustración 4. Productos y subproductos del algodón semilla



Fuente: MINAG

3. ESTADO DEL ARTE.

La mayoría de las investigaciones realizadas y relacionadas con la optimización del rendimiento del algodón se han enfocado a medir y mejorar el rendimiento medido a través del algodón semilla es decir medir el rendimiento en campo, como es el caso de analizar el efecto que sobre el rendimiento tienen factores como: la cantidad de fertilizantes, espacio entre surcos, clima, cantidad de agua, tratamiento genético de la semilla, entre otras condiciones, los cuales, tienen un impacto directo o indirecto sobre el algodón semilla y su posterior transformación en algodón fibra[8],[9],[10].

Si bien, como se mencionó en el anterior párrafo, la mayoría de las investigaciones están relacionadas con la optimización del rendimiento de los cultivos de algodón para que estos generen algodón semilla y fibra de mayor volumen y calidad, las investigaciones realizadas a nivel mundial abarcan en menor medida la manera de optimizar el rendimiento en el proceso de desmote para obtener mayor porcentaje de algodón fibra por cada tonelada de algodón semilla que ingresa a la desmotadora, así como los factores que permiten obtener mayores rendimientos durante el proceso de desmote.

Es por ello que en primera instancia en la presente sección, se realizará una aproximación a las investigaciones realizadas a nivel mundial en lo que concierne a la optimización del rendimiento de los cultivos de algodón y los factores que influyen en este para obtener mayor calidad y volumen de fibra, para posteriormente realizar un enfoque sobre las investigaciones orientadas a la optimización del proceso de desmote encaminado a obtener altos rendimientos de algodón fibra por cada unidad de masa de algodón semilla.

En un estudio realizado en Argentina por [11] cuyo objetivo consistió en determinar la influencia de diferentes dosis de un fertilizante nitrogenado sobre las propiedades tecnológicas de la fibra de cultivos de algodón sembrados en SUE (Surcos ultra estrechos) y como podría modificarse el grado de respuesta de estas propiedades a las diferentes dosis. Los tratamientos se basaron en la comparación de tres dosis del fertilizante Urea (0, 50 y 100 kg/ha de nitrógeno) aplicados en prefloración. Para la determinaciones de la calidad de fibra, se extrajeron muestras de 50 capullos de los surcos centrales de cada parcela, ubicados en el primer nudo de diferentes ramas fructíferas (primera posición) y de diferentes plantas, se los pesó a humedad constante y luego del proceso de desmote, con la fibra resultante se establecieron los parámetros tecnológicos de longitud (mm), uniformidad (%), resistencia (g/tex), elasticidad (%) y micronaire (índice micronaire). [11], mediante el empleo del H.V.I. (High Volume Instrument), en el Laboratorio de Calidad de Fibra del Centro Tecnológico del Algodón de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias de Santiago del Estero. Se realizó el análisis de la varianza para las variables de interés, utilizándose el test de Tuckey para la

|

comparación de medias ($p \leq 5\%$), los cuales después de ser aplicados y analizados se concluyó que “en los sistemas de producción de algodón en surcos ultra estrechos, la única propiedad de la fibra que fue consistente y afectada por la aplicación de fertilizantes nitrogenados en ambos años fue la resistencia, sin diferencias entre ambos niveles de nitrógeno. Las condiciones del ambiente pueden modificar los valores de las variables aunque no modifican su respuesta a los diferentes tratamientos”[11].

En otro estudio más reciente, realizado por [12] en México, cuyo objetivo fue evaluar la interacción de variedades de algodón en diferentes densidades de población bajo un sistema de riego por goteo sub-superficial, para conocer el comportamiento del rendimiento del algodón en este sistema de manejo, se midieron variables como el rendimiento y la calidad del algodón, así como también el uso eficiente del agua. Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y comparación de medias (Tukey, $\alpha = 0.05$) a cada variable en estudio, los cuales, luego de ser analizados arrojaron que en cuanto al rendimiento del algodón, [12] se detectaron diferencias significativas para las densidades de población y altamente significativa para la interacción entre las variedades y las densidades de población, con un coeficiente de variación de 20.96%. La comparación de medias para el rendimiento de algodón semilla, estimado en Mg/ha, indicó que el mayor rendimiento (5.13 Mg/ha) se registró con la variedad transgénica NuCOTN33B, a 190.000 plantas/ha, lo que se explica por el mayor número de plantas que registraron 48% de eficiencia en producción de capullos, como resultado de una menor abscisión floral; asimismo, tuvo la mayor uso eficiente del agua (UEA), con 1.23 kg/ha. El menor rendimiento fue de 3.6 Mg/ha y se registró en la variedad DP5409 con la densidad de población de 150.000 plantas/ha. La menor eficiencia en el UEA, se presentó en la variedad Delta Pine 5690, en la DP de 190.000 plantas/ha, con 0.66 kg/ha. Con respecto a la calidad de la fibra, [12] los componentes de calidad de la fibra de algodón no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, aunque la resistencia fue la única que tuvo diferencias estadísticas (CV4.8%). La mayor resistencia de fibra se registró en la variedad DP5409, de ciclo precoz, con 190.000 plantas/ha, y la menor resistencia en la variedad DP5690, con 150.000 plantas/ha. Estos resultados demuestran la superioridad de los algodones transgénicos en cuanto a su resistencia y eficiencia en el uso del agua.

Otro estudio realizado por [9], enfocado esta vez al rendimiento de la fibra, mas no a la calidad de esta, cuyo objetivo fue determinar los requerimientos de fertilizantes nitrogenados para lograr el máximo rendimiento en cultivos de algodón en surcos ultra estrechos. Para evaluar este rendimiento, en el momento de cosecha se evaluó tres metros de plantas por parcela, registrándose número de capullos por planta y peso promedio de capullo en gramos, la biomasa total en kg/ha. El rendimiento se obtuvo por la cosecha de 5 surcos completos y fue expresado en kg/ha. El índice de cosecha se calculó mediante la fórmula

|

(rendimiento/biomasa total), mientras que la eficiencia de uso del fertilizante se calculó por medio de la fórmula: (Rendimiento del tratamiento fertilizado/rendimiento del testigo sin fertilizar)/Kg de N aplicados[9]. Se realizó el análisis de la varianza para las variables de interés, utilizándose el test de Tuckey para la comparación de medias ($p \leq 5\%$), de dicho análisis se pudo concluir que “la adición de fertilizantes nitrogenados mejora significativamente la producción de algodón sembrado en surcos distanciados a 0,35 m, produciendo un aumento en el rendimiento a través de un mayor número de capullo y peso de capullo. Comparando ambos tratamientos fertilizados entre sí las mayores dosis producen los mejores rendimientos debido a un mayor número de capullos, pero las dosis de 50 kg de N presentan una mejor eficiencia de uso por cada kg de fertilizante aplicado”[9]

El proceso de desmotado de algodón, y la maquinaria utilizada para este propósito, se han evaluado en numerosos estudios en lo que respecta a maximizar el rendimiento de en la fibra y la tasa de desmotado sin afectar negativamente las propiedades de calidad de la fibra[13] señala que en algunos casos, se encontraron mejoras en la calidad de la fibra con respecto a los procesos convencionales. Sin embargo, la cuestión sigue siendo en cuanto a qué velocidad deben funcionar los diversos componentes del cuerpo desmotador (the powered roller ginning) y la energía que debe utilizarse para optimizar el rendimiento. La máquina de desmote para el proceso estudiado tiene tres componentes principales: el rollo de remo, la sierra, y el rollo de semillas de los dedos. Las velocidades de los tres componentes principales, así como la tasa de carga en la máquina, tiene un impacto sustancial en la tasa de desmotado, limpieza, y propiedades de la fibra de la semilla de algodón desmotado. El autor presenta los resultados de un estudio de optimización llevado a cabo en la en el Departamento de Agricultura de EE.UU, el laboratorio de Investigación Agrícola en Lubbock, Texas. Los resultados se basan en muestras de fibras tomadas después del desmote del algodón (antes de limpiar la fibra) y después de una etapa de limpieza de la fibra, también se tomaron muestras de semillas, y los datos de rendimiento. De las catorce variables de respuesta evaluadas, cuatro variables resultaron significativas en el modelo diseñado: neps tegumento, el contenido de fibra corta, la tasa de desmotado, y el daño mecánico visible. Varias soluciones óptimas se obtuvieron sobre la base de los factores de entrada utilizados en la evaluación. Cuando se incluyen todas las variables de respuesta en el análisis, los parámetros óptimos de operación fueron: velocidad del rollo de remo = 209 y 209 rpm, la carga del rollo = 17,1 y 17,0 amperios, velocidad de la sierra = 831 y 829, y la velocidad del rollo de semillas de los dedos= 26 y 21 rpm, respectivamente.

Otro estudio similar fue el realizado por [14] realizado en diferentes marcas de desmotadoras, para optimizar los componentes operativos del rodillo eléctrico en el desmotado y así alcanzar la tasa de producción óptima, la mejor limpieza, y mejores propiedades de la fibra en el desmotado de algodón en rama. La optimización se realizó siguiendo la metodología de superficie de respuesta y las

funciones de conveniencia. Una vez que los estudios de optimización se completaron los estudios de validación y comparación se llevaron a cabo. Los estudios de validación valorando los resultados obtenidos en los estudios de optimización, mientras que las pruebas de comparación se realizaron frente al desmotado convencional. Los resultados de estos estudios indican algunas mejoras con respecto al desmote convencional, encontrando mejores propiedades de la fibra, limpieza de la pelusa, y / o velocidad de procesamiento

En otro trabajo realizado por [15], se describe la optimización de un proceso textil por medio de dos enfoques diferentes: el uso de un algoritmo genético y el uso de una técnica de diseño experimental. Se considera que la eficacia de cada método para alcanzar el óptimo y la naturaleza de la información obtenida con respecto al proceso. En este trabajo se decidió comparar las técnicas de diseño experimental como una herramienta de optimización para uso en la industria frente al algoritmo genético GA, comparación realizada mediante un proceso textil como sistema de prueba. Una serie de ensayos se llevó a cabo en la Universidad escocesa de Textiles para optimizar un proceso de fricción de hilado de algodón con cuatro factores controlables y dos resultados mensurables: la velocidad de liberación de material, velocidad del rozamiento o fricción, velocidad de la batidora, presión del aire. Con el fin de cuantificar la calidad del producto dos resultados medibles (la resistencia a la rotura y la uniformidad de los hilados) fueron seleccionados en base a las necesidades del cliente estándar y combinados en una única medida de la aptitud la cual se considera como la resistencia a la rotura en gramos. En cuanto a la eficacia de los métodos se refiere, las técnicas de diseño experimental alcanzan un óptimo de 473 g con 33 ensayos experimentales, mientras que el algoritmo genético alcanza un óptimo de 463 g con 20 ensayos. Lo que ubica las técnicas de optimización metaheurísticas por encima de los diseños experimentales, para este caso. El autor señala que aunque el experimento sea ejecutado nuevamente las soluciones sean posiblemente las mismas o muy similares, por el contrario para los algoritmos genético las soluciones serían diferentes debido a su población inicial aleatoria haciendo de este método una herramienta muy variable. El enfoque de diseño experimental proporciona más información sobre el proceso en sí, por ejemplo, las interacciones entre los factores experimentales y las regiones en las que los resultados buenos y malos se producen. El algoritmo por el contrario proporciona información de la mejor solución encontrada. Desde el punto de vista del gerente de producción, la técnica del diseño experimental es preferible debido a la información que genera. Desde el punto de vista de los recursos, sería preferible el algoritmo pues genera un mejor resultado. Sin embargo comparando las soluciones óptimas de los dos métodos revela que el punto óptimo es similar en ambos casos.

En trabajos más recientes realizados por el Centro de investigación de Plantas de la Universidad estatal de Mississippi [16], cuyo objetivo de este estudio fue investigar la fotosíntesis de la hoja del algodón, el crecimiento de plantas, la reflectancia espectral del dosel, y las respuestas de rendimiento de pelusa, con

|

respecto a la tasa de aplicación de Nitrógeno (N). Los tratamientos incluyeron cuatro dosis de N de 0, 56, 112 y 168 kg N/ha. El aumento de la dosis de N afectó significativamente la tasa de fotosíntesis de la hoja de algodón, la eficiencia de uso, pero no tuvieron efecto sobre la partición de N entre los tejidos de las plantas. Este estudio representó un claro avance en la aplicación de diseños experimentales en la optimización del rendimiento del cultivo, aun así no realiza un estudio del rendimiento del cultivo luego de la fase de desmote.

En un estudio realizado por [17] documenta la historia y estado actual de la tecnología de desmotado de algodón en todo el mundo, ofrece una descripción básica de las principales tecnologías utilizadas y su evolución reciente, y ofrece una visión general del proceso de desmotado por país. En el trabajo se analiza y compara el desempeño la máquina de rodillos y de sierra en términos de costos de inversión y de procesamiento, requisitos operacionales, la calidad y los precios de la fibra. El objetivo de este estudio complementario fue evaluar las ventajas y desventajas de las principales tecnologías disponibles para separar la fibra del algodón en bruto y llevar a cabo un análisis económico de los beneficios respectivos de estas dos tecnologías para la producción de algodón en África. El estudio muestra que la elección de la tecnología de desmote es un factor importante de rendimiento.

En un trabajo realizado por [18], en el cual se añadió una pequeña cantidad de humedad a las semillas de algodón durante el desmotado para determinar el impacto sobre propiedades de la fibra medida por el Sistema Avanzado de Información sobre Fibras (AFIS) instrumentos que miden el neps y el porcentaje de fibras cortas. En este proyecto, la mitad de las pacas fueron desmotadas con el secado moderado y la otra mitad tenían aire húmedo. Según lo determinado en este procedimiento las propiedades de la fibra según el AFIS fueron significativamente mejores para la fibra con la restauración de la humedad antes de desmotado, en el que el contenido de humedad era de 5.6% con un promedio de secado del 4.8%.

En [19], realizan una investigación con el objetivo de evaluar los niveles de humedad aprovechables en el suelo antes del riego sobre el rendimiento algodonero. Para alcanzar este objetivo, los investigadores construyeron una función de respuesta que les permitió predecir la ganancia de algodón en semilla. Se evaluó la variedad precoz Delta Pine 565 en dos etapas fenológicas (X_1 y X_2), donde X_1 , comprende desde la germinación hasta el inicio de la floración y X_2 del inicio de la floración (50 % de plantas con flores) hasta la formación de capullos. Para cuantificar el balance hídrico, se midió humedad en suelo con una sonda de neutrones en capas de 15 cm hasta una profundidad de 105 cm. Se utilizó un arreglo factorial y el análisis estadístico de la información se realizó por un modelo de regresión múltiple y análisis de varianza. El mejor ajuste ($R_2=0.72$) se obtuvo con la función $Y=0.6705553+0.15830168X_2-0.0014(X_2)^2$. El ANOVA mostró diferencias significativas ($P<0.05$) entre tratamientos. Los valores X_1 y X_2 más

favorables de humedad aprovechable fueron 35% y 57% respectivamente. Los resultados indican que la humedad aprovechable en la segunda etapa (la cual estaba comprendida entre el inicio de la floración hasta la formación de capullos) presentó mayor efecto sobre el rendimiento de algodón en hueso[19].

Como se mencionó anteriormente, la literatura relacionada con la optimización del proceso de desmote para obtener altos rendimientos en fibra de algodón, son muy escasos en Colombia y Latinoamérica, ya que gran parte de las investigaciones se centran en el rendimiento en campo y en el mejoramiento de la calidad.

En un estudio realizado por [20], evalúan las variedades de algodón con las cuales se obtienen los mejores rendimientos en fibra. Los lotes de algodón de las 8 variedades comerciales objeto de estudio fueron sembrados en 4 localidades del Caribe húmedo (medio y bajo Sinú-Córdoba) y una localidad en el Caribe seco (sabanas de San Pedro-Sucre). El diseño utilizado fue el de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y parcelas de seis surcos de siete metros de longitud c/u, distancia entre surcos 80 cm y distancia entre plantas de 20 cm, para una población por hectárea de 62500 plantas. Para el análisis estadístico se hizo análisis de varianza y se compararon las medias de cada variable, con una prueba de diferencia mínima significativa (LSD), por localidad y combinado para cada zona. Al evaluar las variedades SINUANA M-137, VALLENATA M-135, DP-90 IMP, DP-5415, DP-OPAL, CORPOICA M-123, DP-90 NAL, CARIBEÑA M-129, los investigadores encontraron que las variedades CARIBEÑA M-129, VALLENATA M-135 y SINUANA M-137, son las que obtienen mejores rendimientos en fibra, siendo estos 39.33, 38.91 y 38.46 respectivamente. Ver tabla 4.

Tabla 4. Rendimiento en fibra de acuerdo a la variedad

Ent	Genotipo (Variedad)	Algodón semilla (Kg/Ha)	Fibra (Kg/Ha)	Rendimiento en % de Fibra
1	SINUANA M-137	2023	779	38,46
2	VALLENATA M-135	2015	782	38,91
3	DP-90 IMP	2361	879	37,28
4	DP-5415	1905	694	36,4
5	DP-OPAL	2853	1062	37,22
6	CORPOICA M-123	2266	864	38,16
7	DP 90 NAL	2756	1025	37,16
8	CARIBEÑA M-129	2436	956	39,33
Media		2327	880	37,87

Fuente: Cadena *et al* (2003)

|

En un estudio realizado por [21] en donde se evalúan las condiciones del algodón para optimizar el proceso de desmote, encuentran que el porcentaje de humedad con el que el algodón debería entrar a la desmotadora para obtener mejores rendimientos debe oscilar entre el 5 y el 7%, ya que de esta manera se reduce el tiempo de secado y se produce menos naps y neps que reducen al final el rendimiento en fibra de algodón; al minimizarse la cantidad de estos elementos indeseables durante el proceso de desmote se obtiene un incremento en el rendimiento en fibra de algodón. Además de lo anterior, el algodón con un contenido de humedad demasiado elevado no se limpiará o desmotará debidamente y no será fácil separarlo en mechones aislados, sino que formará tapones que pueden obstruir y dañar el mecanismo de la desmotadora e, incluso, bloquear todo el proceso de desmotado, si el algodón se seca demasiado, este pierde mucha humedad, reduciendo también su masa y por tanto el rendimiento en fibra [22].

En otra investigación más reciente, realizada por [23] en la cual evalúan los mecanismos de restauración de la humedad del algodón para agregar peso a este e incrementar el rendimiento en fibra en el desmote, explican que la humedad se puede agregar durante el procesamiento de semillas de algodón utilizando tolvas de humedad del aire antes de la desmotadora. Los principales métodos de humidificación son el aire humidificado y los sprays de agua líquida, aunque también existen combinaciones de estos sistemas. Los sistemas de aire humidificado dependerán de la capacidad de la fibra de algodón para absorber el vapor de agua del aire circundante. La temperatura y la humedad del el aire tiene una influencia directa sobre el contenido de humedad de la fibra de algodón durante el desmote y por tanto en el rendimiento en fibra. En el proceso de humidificado, explica [23], el aire se calienta con el fin de aumentar su vapor de agua, la capacidad de carga y aumentar la presión de vapor de agua para la absorción más rápida de la humedad por parte de la fibra de algodón. El aire humidificado puede ser utilizado en el transporte de la mota en el condensador, proporcionando una distribución relativamente uniforme de la humedad. Uno de los problemas comunes con el sistema de control de aire humidificado es la diferencia de temperatura entre la fibra y el aire circundante y/o la condensación de líquido en las superficies metálicas de la desmotadora; el sistema de aire humidificado rara vez puede incrementar la humedad de la fibra del algodón en un 2%. Los sprays de agua líquida permiten una rápida aplicación del agua, pero no fomentan la absorción del líquido en la fibra, por lo tanto, el agua líquida no está intrínsecamente vinculada con la fibra, pero está en la superficie esta, ya que el algodón tiene un depósito de cera natural y otras sustancias, especialmente calcio y magnesio, sobre o en la pared celular primaria que lo hace repelente al agua; este sistema puede incrementar la humedad de la fibra un poco más que el anterior. En el estudio realizado por [22], se logró incrementar el porcentaje de humedad de las muestras de algodón que oscilaban entre el 3,7 y 6,2% hasta un 6,2 y 15,6% luego del proceso de humidificación, para así ganar un poco más de peso a causa de la humedad y elevar el rendimiento en fibra del algodón sin

|

sacrificar su calidad. [22] Concluyen en su estudio que el algodón debe ganar o perder humedad en el proceso de desmote sobre la base de las condiciones de humedad contenida en él, el algodón demasiado seco o con deficiencias de humedad (porcentajes de humedad inferiores al 5%) es colocado en el aire húmedo y se beneficia con humedad, mientras que el algodón demasiado húmedo es sometido a aire seco y así pierde humedad. Para cada combinación de temperatura y humedad relativa en el ambiente, hay un equilibrio correspondiente contenido de humedad para el algodón. Por ejemplo, si las muestras de semillas de algodón y la fibra son colocadas en el aire con una humedad relativa del 50% y a una temperatura de 70°F, la humedad de las fibras será de aproximadamente el 6% y el de semilla de algodón en el orden del 8% aproximadamente.

3.1. Variables que afectan el rendimiento en fibra.

Las investigaciones realizadas con el fin de medir el rendimiento en fibra a partir de la cantidad de algodón semilla que ingresa al proceso de desmote, indican que está influenciado por una serie de variables dentro de las cuales podemos mencionar las siguientes.

3.1.1. Nivel de materia extraña presente en el lote.

El nivel de suciedad en los lotes de algodón semilla como pequeños trozos de madera y hojas anchas principalmente, es un determinante en el rendimiento del algodón fibra, por eso es conveniente tener los mínimos niveles de suciedad antes del proceso de desmote, es por ello que retirar la materia extraña del algodón semilla se realiza en varias etapas, que van desde retirar partículas extrañas del algodón por gravedad o succión de aire hasta la implementación de cilindros provistos con cepillos de nylon y sierras[4].

Normalmente el algodón se contamina en el campo y en la recolección. La cantidad de materias extrañas varían según las condiciones de recolección, el proceso de secado y limpieza en el desmotado, afectando el rendimiento en fibra. A pesar de que todo se haga cuidadosamente y en las mejores condiciones, es imposible evitar totalmente la presencia de algunos restos de hojas e impurezas. Además de las hojas de tamaño grande y pequeños trozos de madera, existen otras impurezas, como pequeños tallos, semillas enteras o partidas, arena, aceite y polvo, los cuales representan pérdida en el rendimiento en fibra, ya que dichos residuos deben ser separados durante el proceso de desmotado, generando menos porcentaje de algodón fibra por cada unidad de masa de algodón semilla que ingresa a la desmotadora[4]. En la tabla 5 aparece el contenido medio de impurezas del algodón clase Upland Americano, después del proceso de desmote.

Tabla 5. Contenido medio de impurezas Upland Americano

Clase Upland Americano	Contenido Medio de impurezas
Strict Middling	1,9
Middling	2,3
Strict Low Middling	3,1
Low Middling	4,4
Strict Good Ordinary	5,6
Good Ordinary	7,2

Fuente: López (2002)

3.1.2. Nivel de humedad con el que el lote entra al proceso.

Para realizar mejoras significativas en el desmote de algodón y obtener así una fibra con mayor rendimiento y calidad como resultado de este proceso, es controlando el secado de manera estricta, ya que la humedad del algodón semilla es un factor neurálgico que incide directamente sobre el rendimiento. El contenido de humedad es uno de los factores vitales en el proceso de desmote, ya que al tener un algodón en un rango entre el 5% y el 7% de humedad se obtiene una mejor eficiencia en el desmote y los grados más altos de rendimiento[4].[21].

Los porcentajes de humedad óptimos se consiguen mediante un secamiento previo al desmote, en el cual se tienen en cuenta el contenido de humedad, la humedad relativa, la temperatura, velocidad y volumen de aire de secado, además del tiempo de exposición. Ya que la humedad es extraída por la diferencia que hay entre las presiones de vapor presentes en el proceso, la del agua presente en el aire secado y la presente por la humedad del algodón, entre mayor sea esta diferencia, más rápido será el proceso de secado.

El algodón en rama con un contenido de humedad demasiado elevado no se limpiará o desmotará debidamente y no será fácil separarlo en mechones aislados, sino que formará tapones que pueden obstruir y dañar el mecanismo de la desmotadora e, incluso, bloquear todo el proceso de desmotado. El algodón en rama con demasiada humedad también formará dobleces apretadas, conocidas como “anzuelos”, que permanecen en la fibra desmotada y degradan su aspecto. El exceso de humedad se elimina exponiendo el algodón a aire caliente y seco. Los sistemas de secado pueden dañar seriamente la fibra si el algodón se seca demasiado, por lo que deben utilizarse correctamente para evitar dañar la calidad del algodón. El secado a bajas temperaturas es mucho menos perjudicial que el secado a temperaturas altas, ver ilustración 4.

Ilustración 5. Humedad y deterioro de la fibra



Fuente: Centro de Comercio Internacional

Cuando el contenido de humedad es demasiado bajo, el algodón puede adherirse a las superficies metálicas debido a la electricidad estática que generan las fibras, y podría llegar a obstruir y parar todo el mecanismo. Cuando el contenido de humedad es menor del 5%, es muy probable que la fibra se deteriore. Para comprimir algodón muy seco es necesario aplicar más fuerza y presión que cuando el algodón está húmedo. Cuando se prensa y se embala algodón con unos niveles de humedad muy bajos, a menudo resulta difícil obtener el peso y la densidad de la bala deseados sin tener que añadirle humedad.

Es necesario ajustar los secadores de manera que el contenido de humedad de la fibra que entra en la desmotadora sea del 6%–7% para no dañar la fibra. El algodón con un nivel de humedad semejante soportará mejor el esfuerzo que supone el desmotado sin romperse. No obstante, el algodón con un contenido de humedad del 5% será más fácil de limpiar y presentará un aspecto más suave, motivo por el que, erróneamente, lo prefieren los sistemas de clasificación y de comercialización. Las limpiadoras retiran más basuras con unos niveles de humedad por debajo del 6%–7%, pero el deterioro que sufre la fibra también es mayor. Un nivel de humedad superior al 7% preservará la longitud de fibra, pero causará problemas en la desmotadora, y la limpieza será algo deficiente.

El mejor modo de preservar la longitud de la fibra consiste en mantener un nivel de humedad del 6,5%–8%, pero cuanto más alto sea el nivel de humedad, menores serán la eficiencia de la limpieza y la velocidad del desmotado. El desmotado con una humedad por debajo del 5% puede deteriorar seriamente las fibras, mientras que un nivel superior al 8% produce una fibra más basta, reduce el rendimiento de la desmotadora y la limpieza será menos efectiva. Los efectos de desmotar algodón con un nivel de humedad inferior al 5% son un hilado menos resistente y de peor aspecto, y un aumento de fibras cortas en la cinta de cardado.

|

Si se añade humedad a la fibra antes de separarla de la semilla y limpiarla se contribuirá a conservar la longitud de fibra y reducir la cantidad de fibras que se rompen durante el proceso, pero añadir humedad una vez que la fibra ha sido desmotada y limpiada no aumentará su longitud. El restablecimiento de la humedad ofrece además otras ventajas, como la reducción del nivel de electricidad estática del algodón, una disminución del volumen de algodón necesario para llenar una paca estándar y una reducción también de la fuerza necesaria para prensar la paca. La fuerza elástica que ejercen las ligaduras de la paca también es menor cuando la humedad del algodón es mayor. El nivel de humedad de la fibra recomendado, que es del 6%–7%, tiene en cuenta los aspectos de producción así como los aspectos de calidad. Un método utilizado para restablecer la humedad en la fibra de algodón consiste en soplar aire húmedo a través del algodón para humedecerlo. El nivel de restablecimiento de la humedad que puede obtenerse con este sistema es limitado, especialmente cuando el desmotado se hace a velocidades altas. Las fibras de algodón pierden parte de su elasticidad, con lo que se reduce la fuerza de comprensión necesaria para prensar las pacas. Otro modo de restablecer la humedad es atomizar agua y rociarla directamente sobre el algodón.

En comparación con la desmotadora de sierra, la desmotadora de rodillos tiene mayor rendimiento y produce fibra más larga, con un menor contenido de fibras cortas y neps, aunque el contenido de materia extraña y semilla es mayor. La desmotadora de rodillos produce una fibra con un aspecto menos suave que el de la fibra desmotada con sierra.

3.1.3. Nivel de temperatura durante el proceso.

La temperatura durante el proceso de desmote es fundamental, ya que esta afecta de manera directa el rendimiento y la calidad del algodón fibra; el secado se consigue gracias a los secadores de torre, los cuales están conformados por una serie de bandejas, por las cuales se hace pasar una mezcla de algodón semilla y aire caliente, la temperatura del aire caliente depende del grado de humedad del algodón semilla [4]. Controlar la temperatura en el desmote es de suma importancia ya que si esta es demasiado baja, el algodón semilla pasaría con exceso de humedad por los equipos de transporte, limpieza y desmote, en tacos o montones que causan una limpieza ineficiente, atascamientos, incendios, daños en la maquinaria y por consiguiente grados comerciales bajos; en el caso de los niveles de temperatura demasiado altos, el algodón semilla se seca demasiado, afectando así el recubrimiento de cera del algodón y se vuelve quebradizo, perdiendo así resistencia la fibra y presentándose rupturas de estas. Esto aumenta el contenido de fibras cortas y reducción en la calidad del hilado[24].[21].

La temperatura aplicada durante el proceso de desmote, dependerá del grado de humedad del algodón semilla, y su objetivo es reducir la humedad de un 5% a un

7% para facilitar la separación de las impurezas y realizar un buen desmotado que contribuya a incrementar el rendimiento en fibra. La temperatura del aire del secadero puede oscilar entre 65°C y 120°C cuando el algodón está seco.

Tabla 6. Impacto de la temperatura de secado en el rendimiento en fibra

Rango de temperatura de secado	Efecto en el rendimiento en fibra
Temperaturas mayores que 175°C (350°F)	Pueden reducir el rendimiento en fibra, la resistencia individual de la fibra y aumentar la rotura de la fibra
Temperaturas inferiores a 120°C (250°F)	La fibra no se ve tan afectada

Fuente: Anthony et al (2001).

3.1.4. Número de limpia fibras aplicado durante el proceso.

El número de limpiadores de fibra puede mejorar el grado de limpieza del algodón semilla, sin embargo puede ocasionar demasiada merma y reducir los rendimientos de la fibra. Los limpia fibras tienen un impacto importante en la eficiencia del proceso de desmote y en el rendimiento del algodón fibra por ello se recomienda emplear el número adecuado de ellos y prestar especial atención a los ajustes, inclinación, desgaste y espacio de las sierras del cilindro limpiador de fibra, para que operen de manera adecuada generando como resultados un menor nivel de pérdida de la fibra y maximización en la remoción de la materia extraña. Según un estudio realizado por [25], cada limpia fibras puede reducir la longitud de la fibra en 1/32 de pulgada.

Ilustración 6. Pérdida de peso de la fibra por cada limpia fibras utilizado

Weight Loss after Lint Cleaner		
Stages of Lint Cleaners	Total Weight Loss (lb)	Fiber Loss (lb)
1	26.9	6
2	7.0	2.7
3	4.5	2.3
Total Bale Weight Loss	38	11

Fuente: Valco (2009)

3.2. Variables que afectan la calidad

Para determinar la calidad de la fibra de algodón obtenida en el procesos de desmote se siguen una serie procedimientos estandarizados desarrollados por el [5], autoridad mundial para temas relacionados con el algodón, para la medición

de aquellos atributos físicos de la fibra de algodón que afectan la calidad del producto terminado y/o la eficiencia manufacturera. La clasificación del USDA corrientemente consiste en determinaciones de longitud de fibra, uniformidad de la longitud, resistencia, Micronaire, color, preparación, hoja y materias extrañas. Las mediciones para los factores de calidad del algodón son realizadas por instrumentos de precisión de alto volumen, comúnmente referido como clasificación “H.V.I.” (“High Volume Instruments”).

3.2.1. Longitud de la fibra.

La longitud de la fibra es la longitud promedio de la mitad más larga de las fibras (longitud media de la mitad superior). La misma es informada en centésimas y 1/32 de pulgada. Es medida pasando una “barba” de libras paralelas a través de un punto de detección. La barba es formada cuando las fibras de una muestra de algodón es tomada por una grampa, después peinada y cepillada para enderezar y paralelizar las fibras.

La longitud de la fibra es fundamentalmente determinada por la variedad, pero la exposición de las plantas de algodón a temperaturas extremas, deficiencias de agua o de nutrientes, puede acortar la longitud. Una limpieza y/o un secado excesivos en la desmotadora pueden también resultar en longitud de fibra más corta. La longitud de la fibra afecta a la resistencia del hilado, la regularidad del hilado y la eficiencia del proceso de hilatura. La finura del hilado que puede ser exitosamente producido a partir de determinadas fibras es también influenciada por la longitud de la fibra.

3.2.2. Uniformidad de la longitud.

La uniformidad de la longitud es la relación entre la longitud media y la longitud media de la mitad superior de las fibras y es expresada como un porcentaje. Si todas las fibras en el fardo fueran de la misma longitud, la longitud media y la longitud media de la mitad superior serían iguales, y el índice de la uniformidad sería 100. Sin embargo, hay una variación natural en la longitud de las fibras del algodón, de manera que la uniformidad de la longitud será siempre menos que 100. Existen tablas que pueden ser usadas como guías en la interpretación de las mediciones de la uniformidad de la longitud, ver tabla 7

Tabla 7. Índice de Uniformidad de la Longitud HVI (%)

Grado de Uniformidad	Índice de Uniformidad de la Longitud HVI (%)
Muy alta	Arriba de 85
Alta	83-85
Intermedia	80-82
Baja	77-79

Muy baja	Debajo de 77
----------	--------------

Fuente: USDA, modificado

La uniformidad de la longitud afecta la regularidad y la resistencia del hilado y la eficiencia del proceso de hilatura. Está relacionada también con el contenido de fibra corta, el algodón con un bajo índice de uniformidad probablemente tiene un alto porcentaje de fibras cortas. Tal algodón puede ser dificultoso de procesar y probablemente puede producir hilados de baja calidad.

3.2.3. Resistencia de la fibra

Las mediciones de resistencia son informadas en términos de gramos por tex. Una unidad tex es igual al peso en gramos de 1.000 metros de fibra. Por lo tanto, la resistencia informada es la fuerza en gramos requerida para romper una cinta de fibra de un tex de tamaño. La tabla 8 puede ser usada como una guía en la interpretación de las mediciones de la resistencia de fibra.

Tabla 8. Resistencia de HVI (gramos por tex)

Grado de Resistencia	Resistencia de HVI (gramos por tex)
Muy resistente	31 y arriba
Resistente	29-30
Promedio	26-28
Intermedio	24-25
Débil	23 y debajo

Fuente: USDA, modificado

Las mediciones de resistencia son hechas sobre las mismas barbas de algodón que son usadas para la medición de longitud de fibra. La barba es apretada en dos juegos de grampas, separadas un octavo de pulgada, y es determinada la cantidad de fuerza requerida para romper las fibras. La resistencia de fibra es fundamentalmente determinada por la variedad. Sin embargo, puede ser afectada por deficiencia de nutrientes en la planta y exposición a la intemperie.

Existe una alta correlación entre resistencia de fibra y resistencia de hilado. También, el algodón con alta resistencia de fibra probablemente tenga menos rotura durante el proceso manufacturero.

3.2.4. Micronaire y madurez

El Micronaire es una medida de finura y madurez de la fibra. Un instrumento de corriente de aire es usado para medir la permeabilidad del aire de una masa

constante de fibras de algodón comprimidas a un volumen fijado. La ilustración 6 puede ser usada como una guía en la interpretación de las mediciones de Micronaire.

Ilustración 7. Relación de lecturas Micronaire a valor de mercado

RELACION DE LECTURAS MICRONAIRE A VALOR DE MERCADO				
3,4 e inferior	3,5 - 3,6	3,7 - 4,2 Rango de premio	4,3 – 4,9	5,0 y superior
Rango de base				
Rango de descuento				

Fuente: USDA

Las mediciones de Micronaire pueden ser influenciadas durante el período de crecimiento por condiciones ambientales tales como humedad, temperatura, luz solar, nutrientes de la planta y extremos en poblaciones de plantas o capullos.

La finura de la fibra afecta el comportamiento del proceso y la calidad del producto final en varias formas. En los procesos de apertura, limpieza y cardado, algodones de bajo Micronaire, o fibra fina, requieren velocidades de proceso más bajas para prevenir daño a las fibras. Hilados confeccionados con fibras más finas resultan en más fibras por sección transversal, lo que a su vez produce hilados más resistentes. La retención y absorbencia de tinte varían con la madurez de las fibras. Cuanto mayor la madurez, mejor la absorbencia y retención.

3.2.5. Color

El color del algodón es determinado por el grado de reflectancia (Rd) y amarillez (+b). La reflectancia indica cuánto brillo o apagamiento tiene una muestra y la amarillez indica el grado de pigmentación de color. Es usado un código de color de tres dígitos.

El color de las fibras de algodón puede ser afectado por lluvias, heladas, insectos y hongos, y por manchado a través del contacto con el suelo, pastos, u hojas de la planta de algodón. El color también puede ser afectado por niveles excesivos de humedad y temperatura mientras el algodón está siendo almacenado, antes y después del desmote.

A medida que el color del algodón se deteriora debido a condiciones ambientales, aumenta la probabilidad de reducir la eficiencia del proceso. El deterioro del color también afecta la capacidad de las fibras para absorber y retener tinturas y acabados.

3.2.6. Impureza

La impureza es una medida de cantidad de otros materiales que no sean fibra en el algodón, tales como hoja y corteza provenientes de la planta de algodón. La superficie de la muestra de algodón es explorada por una videocámara y el porcentaje de la superficie del área ocupada por partículas de impurezas es calculada. Aunque la determinación de impurezas y el grado de hoja del clasificador no son lo mismo, existe una correlación entre ambos como se muestra en la tabla No. 9.

Tabla 9. Relación de mediciones de impureza

Relación de mediciones de impureza con grado de hoja del clasificador	
Medición de impureza (Promedio 4 años)(% área)	Grado de hoja del clasificador
0,12	1
0,20	2
0,33	3
0,50	4
0,68	5
0,92	6
1,21	7

Fuente: USDA, modificado

3.2.7. Grado de hoja

El grado de hoja del clasificador es una estimación visual de la cantidad de partículas de hoja de la planta en el algodón. Hay siete grados de hoja, designados como grado de hoja “1” hasta “7”, y todos están representados por estándares físicos. Además, hay una designación “debajo de grado” que es descriptiva.

El contenido de hoja es afectado por la variedad de algodón, métodos de cosecha y condiciones de cosecha. La cantidad de hojas remanente en la fibra después del desmote depende de la cantidad presente en el algodón previo al desmote y del tipo y cantidad de equipo de limpieza y secado usado. Aún con los métodos más cuidadosos de cosecha y desmote, una pequeña cantidad de hojas queda en la fibra de algodón.

3.2.8. Materias extrañas

Las materias extrañas son cualquier sustancia en el algodón que no sea fibra u hoja. Ejemplos de materias extrañas son corteza, pasto, retorcido de púas, fragmentos de tegumento de semilla, polvo, y aceite. El tipo de materias extrañas y una indicación de la cantidad (liviana o pesada), son señaladas por el clasificador en el documento de clasificación.

3.3. El rendimiento y la calidad del algodón fibra

El cultivador de algodón, es el que paga de una manera u otra para que su algodón sea desmotado. Es responsabilidad de la desmotadora maximizar los ingresos procedentes de todos los lotes de algodón. Esto no significa simplemente maximizar el valor de una paca, o el precio por libra de la fibra, o incluso el grado, en su lugar, significa maximizar el retorno para el productor[25].

Las desmotadoras, lo que necesita saber es cómo manejar el proceso de desmotado con el fin de optimizar su rendimiento para los productores y para los clientes de los algodones, las industrias textiles. En general, mientras menor sea el secado y la limpieza aplicada al algodón semilla, mejor para todos los involucrados en este proceso[25].

Hay muchas propiedades que son importantes en el algodón, tales como: longitud de fibra, uniformidad de la longitud, resistencia, Micronaire, color, preparación, hoja y materias extrañas. No es de extrañar que el algodón limpio y de buena calidad vale más por libra que el algodón de mala calidad, ya que para mantener altos estándares de calidad es necesario mejorar las propiedades mencionadas anteriormente[25].

La limpieza consiste en la eliminación de la humedad y la basura del algodón semilla, pero también significa la pérdida de cierto porcentaje de fibra, lo cual implica negociar, calidad por rendimiento en fibra, calidad que es demasiado apreciada por la industria textilera y el rendimiento, que es de suma importancia para el productor de algodón[25]. En Occidente, en general hay una penalización muy dura para altos grados de basura en el algodón fibra. Lo que resulta en una pérdida de beneficios para el productor. Hay que tener cuidado con la limpieza excesiva, ya que esta también reduce la longitud de la fibra, la cual también es penalizada, ya que es perjudicial en el proceso de hilatura en el sector textil[25].

El exceso de secado que a menudo va de la mano con la limpieza excesiva también causa la pérdida de peso comercial, ya que se reducen los niveles de agua de la mota disminuyendo su masa.[25].

|

La longitud del algodón es bastante importante para la industria textil, esta es pagada a un precio superior, ya que la hacen adecuada para la fabricación de hilados finos, fuertes, sin embargo por parte del productor de algodón es un poco difícil conseguirla, ya que esta es afectada en el proceso de desmote[22].

3.4. Factores que determinan el precio base del algodón fibra.

El precio de la tonelada de algodón es fijado de acuerdo a dos parámetros: el grado asignado a cada paca una vez desmotado el lote y las características tecnológicas de calidad de la fibra detectada en las pruebas HVI. Las características tecnológicas son:

- Grado
- Longitud
- Micronaire
- Resistencia
- Trash

Inicialmente el precio base por tonelada se fija de acuerdo al grado y posteriormente dependiendo de los resultados de las demás variables se ajusta el precio, es decir, se aumenta, se mantiene igual o se disminuye dependiendo de las características tecnológicas de calidad la fibra.

3.5. Asignación de grados de clasificación.

Cada paca recibe una clasificación (Grado) de calidad, definido por el color y cantidad de hoja o basura contenida en la muestra tomada de cada paca, esta asignación del grado se hace con el fin de fijar el precio inicial (\$/Ton). Este proceso de clasificación lo realizan dos personas uno por parte de los compradores y otro por los cultivadores, teniendo como referencia Estándares, suministradas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Los Grados de calidad asignados a cada paca y los diferenciales que se reconocen son los mostrados en la tabla 10. Como se ve el grado base es el SLM por encima de éste se reconoce el diferencial indicado y por debajo se castiga.

Tabla 10. Diferenciales para los grados de clasificación del algodón

Grado	Diferencial
GM	3,00
SM	2,00
MP	1,50
M	1,00

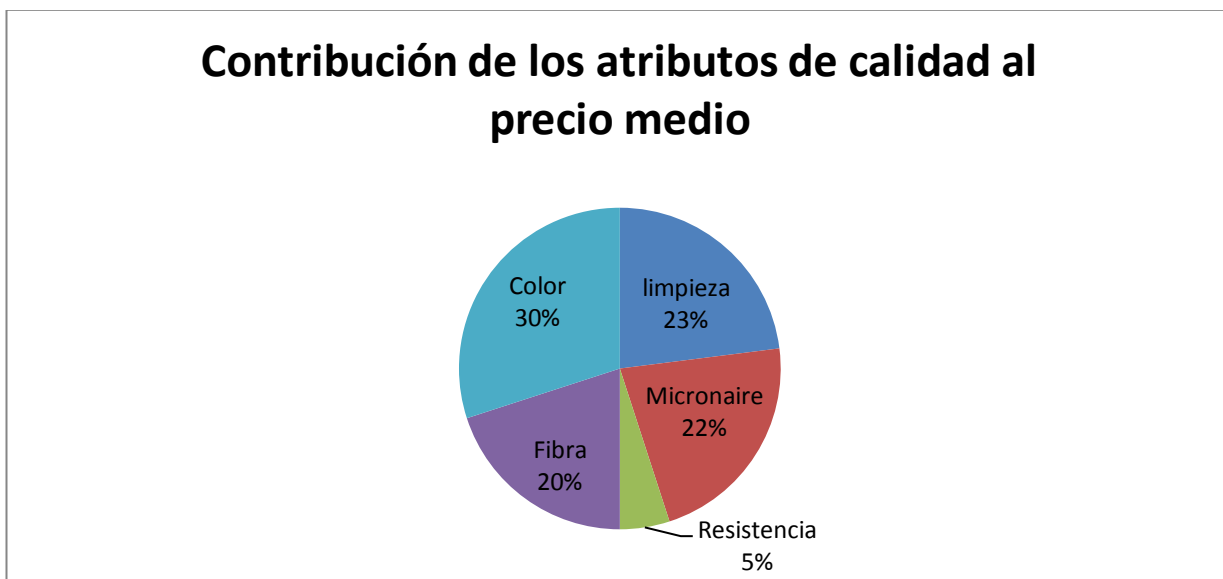
SLMP	0,50
SLM	BASE
LMP	-2,3
LM	-4,6
SGOP	-5,6
SGO	-6,6

Fuente: Diagonal

3.6. Contribución de los atributos de calidad en el precio.

La relación que existe entre el precio de la fibra de algodón y sus propiedades ha sido objeto de una investigación por parte de Chakraborty et al (ver ilustración 8) también Deussen and Neuhaus han presentado cuadros que apuntan a que el precio del algodón y las propiedades de la fibra están relacionados.

Ilustración 8. Contribución de los atributos de calidad.



Fuente: <http://www.guiadealgodon.org/>

En vista de estos datos, es justo que realicen esfuerzos para mejorar las propiedades deseables del algodón y para eliminar o minimizar cualquier propiedad no deseada. Dichos esfuerzos van dirigidos a las prácticas de reproducción, de cultivo y de desmotado, así como a los sistemas y las condiciones de la manufactura textil.

3.7. Maquinaria de desmote.

La gran mayoría de las maquinas desmotadoras se caracterizan por su gran tamaño, con bajo nivel de automatización, y más orientado a lo mecánico, hacen que la maquinaria de desmotado realizan un proceso bastante complejo para separar la fibra de algodón de la semilla, incluyendo otras máquinas para retirar los desechos resultantes y empaquetar el algodón crudo en pacas más fáciles de transportar [26],[3].

La estacionalidad misma del producto, su alto costo de inversión y operación, conlleva a que el trabajo a plena capacidad sea prioritario en materia de programación de las actividades. El mantenimiento correctivo y preventivo de los componentes mecánicos es una actividad critica dentro de la programación de las actividades de una maquina desmotadora ya que la causa originada por fallas conlleva al frenado total de las operaciones [26][3].

Con el paso del tiempo, las desmotadoras fueron perfeccionándose para mejorar el proceso de separado de la fibra de algodón. Las máquinas fueron haciéndose mayores y más complejas, incluyendo una progresiva mecanización y automatización[3],[26].

El proceso de despepitado o desmotado puede variar de unas desmotadoras a otras. Las más utilizadas son las desmotadoras a sierra y las desmotadoras a rodillo, aunque se pueden dar combinaciones de ambas dentro del mismo tren de desmotado. También varía la composición de los trenes, pudiendo incorporar distintos elementos para limpiar y acondicionar tanto el algodón en bruto como la fibra[26],[3].

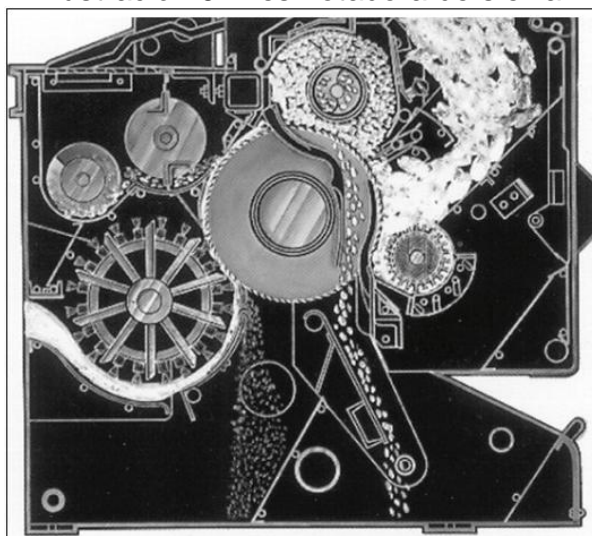
3.7.1. Desmotadora de sierra

La desmotadora de sierra fue inventada por Eli Whitney en 1793. En esta desmotadora giran a alta velocidad sierras redondas entre varillas metálicas paralelas denominadas “costillas”. Las sierras suelen tener 30,5–45,7 cm de diámetro y están montadas sobre un único cilindro a 1,25–2,5 centímetros de distancia entre sí; su número es nada menos que 198. Los dientes de las sierras giran entre las varillas, agarran la fibra y la separan de las semillas, que son demasiado grandes para pasar por la ranura que hay entre las varillas, ver ilustración 21.

La capacidad de una sola desmotadora ha aumentado de menos de 1 paca por hora hasta más de 15. La sujeción de la fibra a la semilla varía en función de las variedades de algodón, el mal estado del campo y el contenido de humedad, entre

otros factores, pero equivale al 55% aproximadamente de la fuerza de rotura, lo que significa que es posible retirar las fibras sin romperlas. La desmotadora, ya sea de sierra o de rodillos, arranca la fibra de la semilla; es el principio fundamental del sistema de desmotado. La capacidad del sistema, la calidad y el rendimiento potencial para la hilatura de la fibra dependen de la secuencia y de los ajustes de la desmotadora. Es muy importante ajustar debidamente las desmotadoras, mantenerlas en buen estado y no permitir que funcionen por encima de su capacidad nominal; una sobrecarga reducirá la calidad del algodón.

Ilustración 9. Desmotadora de sierra



Fuente: Anthony (2007)

El contenido de fibras cortas será mayor si se trabaja con una secuencia más alta que la que recomienda el fabricante. A mayor velocidad de las sierras, mayores serán también el contenido de fibras cortas, las imperfecciones del hilado y los daños que sufrirán las semillas, especialmente si están secas. La alta velocidad del proceso de desmotado y el bajo nivel de humedad de las semillas son la causa de que entre el 2% y el 8% de las semillas resulten dañadas durante el desmotado. Es muy importante, por consiguiente, mantener la desmotadora en óptimas condiciones de funcionamiento, desmotar a los niveles de humedad recomendados y no sobrepasar la capacidad de la desmotadora ni de los otros componentes del sistema.

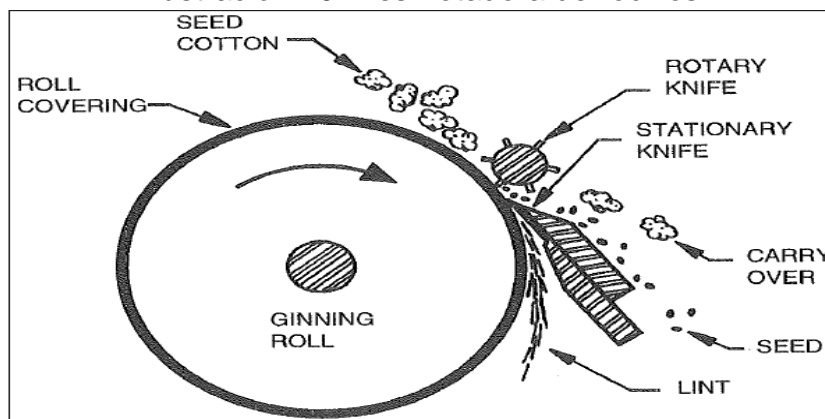
3.7.2. Desmotadora de rodillos

Las desmotadoras de rodillos constituyeron los primeros medios mecánicos para separar la fibra de la semilla. Entre los distintos tipos de desmotadoras se incluyen la Churka, la de cuchilla alternativa y la de cuchilla giratoria. La desmotadora de cuchilla giratoria apenas alcanza el 20% de la velocidad a la que trabaja la

desmotadora de sierra, medida por unidad de longitud. El equipo de acondicionamiento del algodón en rama de las desmotadoras de rodillos es el mismo que se utiliza en las desmotadoras de sierra. La limpieza de la fibra en las modernas desmotadoras de rodillos con cuchilla alternativa se realiza por lo general con limpiadoras de cilindros y limpiadoras por impacto, similares a las que se utilizan para el algodón en rama, y también con limpiadoras por chorro de aire[3].

Las desmotadoras de rodillos constituyeron los primeros medios mecánicos para separar la fibra de algodón de fibra extralarga de la semilla. La desmotadora Churka, de origen desconocido, estaba formada por dos cilindros que giraban juntos a la misma velocidad superficial y separaban la fibra de la semilla con un rendimiento de 1 kg de fibra al día. En 1840, Fones McCarthy inventó una desmotadora de cilindro más eficaz que consistía en un cilindro desmotador de piel, una cuchilla fija apretada contra el cilindro y otra oscilante que extraía la semilla de la fibra a medida que ésta quedaba sujeta entre el cilindro y la cuchilla fija. A finales del decenio de 1950 se desarrolló en los Estados Unidos una desmotadora de cilindro con cuchilla giratoria, ver ilustración 22. El proceso de desmotado con rodillo daña menos la fibra que cuando se utiliza la sierra para extraer la fibra del algodón en rama, aunque también es cierto que el proceso con rodillo es mucho más lento.

Ilustración 10. Desmotadora de rodillos



Fuente: Mayfield et al (1990)

3.8. Procesos de desmote de algodón.

El desmote, es el proceso de separación de la fibra y la semilla del algodón. Es la etapa previa a la industrialización de este. Este proceso agroindustrial requiere de distintas etapas, en donde el algodón con semilla es tratado por distintos medios mecánicos, neumáticos y térmicos para su secado, separación de fibra y semilla,

|

limpieza y presentación de fibra, transporte y embalaje; estos factores influyen de manera notoria en el rendimiento y la calidad comercial e industrial de la fibra[4].

Además de cumplir su función principal (separar la semilla de la fibra), este proceso permite conservar aquellas cualidades y características propias del algodón, de tal manera que se obtenga una fibra con un grado satisfactorio para el productor y calidad hilandera que satisfaga a los requerimientos de los clientes de la industria textil[4].

En Córdoba esta actividad es desarrollada por 7 desmotadoras, todas marca Continental Moss Gordin, y de una tecnología que oscila entre los 15 y 35 años, cuyos propietarios en su gran mayoría son cooperativas, formadas por Agricultores de la región y profesionales del agro, y que además de prestarles el servicio desmote le presta los servicios de créditos representados en dinero efectivo e insumos y asistencia técnica en el cultivo.

El agricultor es quien le paga a la desmotadora para que sus algodones sean desmotados, por lo tanto es responsabilidad de las desmotadoras optimizar los ingresos del agricultor, conservando rendimientos y calidades optimas, esto no significa simplemente maximizar el valor de una paca, o el precio por libra de la fibra, o incluso el grado. En cambio, significa maximizar el retorno para el productor. Como desmotadoras, lo que necesita saber cómo operar las maquinas con el fin de optimizar el rendimiento para los productores y para sus clientes, este mecanismo es el que opera en la mayoría de las desmotadoras de algodón del departamento de Córdoba, y especialmente en la COMPAÑÍA AGROINDUSTRIAL DEL SINU “CAS”, que es la que mayor desmota algodones a terceros.

3.9. Descripción general del proceso de desmote

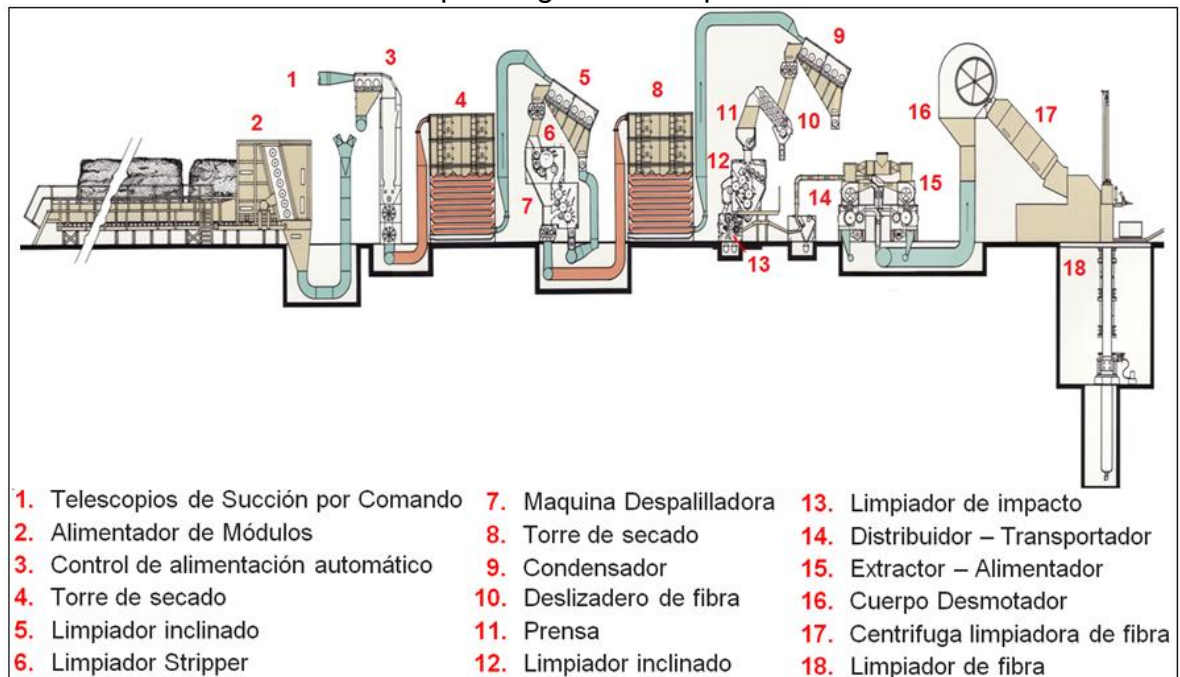
Una planta desmotadora está en realidad compuesta por varias maquinas, cada una con una función distinta, dispuestas en una secuencia para recibir algodón semilla, acondicionarlo, separar la fibra de la semilla, limpiar la fibra, deshacerse de los residuos y de las semillas y empacar la fibra[26]. Cabe aclarar que una planta desmotadora no debe confundirse con el banco desmotador, que es la maquina que específicamente separa la fibra de la semilla.

Una instalación moderna para desmote, ver ilustración 11, independientemente de su complejidad cuenta con los sistemas que se enumeran a continuación [26].[28].

- Sistema de descarga
- Sistema de secado y prelimpieza
- Sistema de distribución y sobrecarga
- Sistema de alimentación y desmote
- Sistema de limpieza de fibra
- Sistema de condensado y restauración de humedad

➤ Sistema de prensado y manejo depacas

Ilustración 11. Esquema general del proceso de desmote



Fuente: Wayne et al (1999)

3.10. Proceso de desmote en la planta

Es todo el proceso al que es sometido el algodón a partir del instante en que es succionado para la descarga en el sistema de secado y prelimpieza y comienza a realizar un recorrido continuo a través de la serie de maquinas que en conjunto se encargan de acondicionarlo, separar la fibra de la semilla (desmotarlo), limpiar y empacar la fibra[4]. Las operaciones de proceso que se llevan a cabo en la Compañía Agroindustrial del Sinú para lograr tales efectos son las siguientes:

- ✓ El algodón es succionado desde las bodegas, por una tubería galvanizada de 14", mediante un ventilador de succión.
- ✓ Inicialmente, llega hasta una trampa, que se encarga de extraer objetos extraños de peso y volumen considerable relativamente, como son: capsulas verdes, piedras, troncos de madera, frutas, piezas metálicas, entre otros.
- ✓ Posteriormente el algodón entra al recibidor y pasa al control de alimentación o torre de alimentación, donde se predispone para la siguiente etapa del proceso dándole soltura.

- ✓ Luego llega hasta el tubo de aire caliente, para ser secado mediante un ventilador que le suministra calor de acuerdo a la temperatura fijada en la secadora. Cabe anotar que en este punto se mide la temperatura de secado, mediante un termómetro análogo que permanece incrustado en el tubo de aire caliente.
- ✓ Inmediatamente es impulsado a la torre de secado, donde la acción conjunta del aire caliente y la disposición interna de las bandejas de la torre ayudan en la extracción de humedad.
- ✓ En este punto el algodón semilla ya está seco y tiene la soltura necesaria para ser impulsado hasta el limpiador inclinado de tocones el cual internamente tiene siete cilindros de tocones, que básicamente se encargan de eliminar materia extraña o suciedad presente.
- ✓ Del limpiador inclinado llega a un limpiador de impacto (inclinado) en el que una serie de discos dentados ubicados en cilindros, extraen impurezas de menor tamaño. Las impurezas o materias extrañas eliminadas hasta este momento en el proceso son desechadas mediante tres ventiladores de impulsión.
- ✓ Posteriormente el algodón semilla cae en el distribuidor – transportador, en la cual un tornillo sin fin distribuye el algodón y alimenta los distintos cuerpos extractores. El algodón semilla que pasa por todo el distribuidor - transportador sin entrar a ninguno de los cuerpos extractores cae en lo que se denomina cuarto exceso o rebalse, desde donde es succionado por un sistema de retroalimentación en el cual un receptor alimenta nuevamente al distribuidor.
- ✓ Ya en el cuerpo extractor, una serie de cilindros con sierras dentadas, y un conjunto de cepillos extraen impurezas y abren el algodón semilla preparándolo para el siguiente paso.
- ✓ El algodón semilla pasa al cuerpo desmotador donde se lleva a cabo el desmote en sí, es decir, donde se separa la fibra de la semilla, esto mediante un conjunto de sierras de 12" dispuestas en una cantidad de 120 por cilindro. La fibra pasa a la siguiente etapa del proceso mientras la semilla es recogida por una canal donde un tornillo sin fin la transporta hasta que es impulsada a la tolva de empaque.
- ✓ Si aun hay presencia de impurezas en la fibra, esta es succionada hasta el equipo limpia-fibras, el cual está dispuesto en paralelo con cada uno de los cuerpos desmotadores. Aquí básicamente se elimina materia extraña o

impurezas de menor tamaño que luego son depositadas en el cuarto de desfogue.

- ✓ La fibra de algodón es depositada en un tubo de alto diámetro por donde es succionada por un ganancial hasta el condensador principal.
- ✓ Luego es enviada a la canal inclinada o deslizadero donde la fibra cae por gravedad hasta el impulsador de fibra, el cual alimenta la caja de la prensa donde la fibra es semipesado mediante el transfer, para posteriormente ser comprimida por la prensa hidráulica de 250 lb
- ✓ De esta manera se obtiene una paca de fibra de algodón a la cual se le extrae una muestra para realizarle la prueba HVI.

3.11. **Políticas internas de desmote en la planta.**

En La Compañía Agroindustrial del Sinú como parte de sus políticas internas de desmote, buscando darle cumplimiento a los lineamientos establecido por el INCONTEX en [29]. Pero hay variables como la humedad y nivel de suciedad del lote que nos son controlables por la desmotadora por lo tanto recibe los algodones bajo las condiciones que lleguen.

- ✓ Reciben algodones bajo todos los porcentajes de humedad sin excepción alguna.
- ✓ Reciben algodones independientemente del contenido de materias extrañas que estos tengan.
- ✓ No practican la mezcla de lotes en las bodegas, así estos posean características iguales (humedad, variedad, agremiación) para su procesamiento.
- ✓ A pesar que cuentan con un sistema de restauración de humedad por aspersión para la fibra desmotada; no aplican esta práctica.
- ✓ La programación del desmote no obedece al el orden de llegada de los lotes.

3.12. **Optimización.**

La optimización, es el proceso de obtener el/lo mejor, si es posible medir y cambiar lo que es bueno y malo. En la práctica, se desea obtener el máximo o mínimo de algo. Por tal razón, la palabra “óptimo”, se entiende como máximo o mínimo dependiendo de las circunstancias. La teoría de optimización, es la rama de las matemáticas que abarca el estudio cuantitativo de los óptimos y el método

|

para encontrarlos. Por otro lado, la optimización práctica, es la colección de técnicas, métodos, procedimientos y algoritmos que pueden ser utilizadas para hallar el óptimo [30].

Los problemas de optimización ocurren en la mayoría de las disciplinas como ingeniería, física, matemáticas, economía, administración, comercio, ciencias sociales, e incluso, política. En ingeniería, es posible encontrar problemas en áreas como eléctrica, civil, mecánica y química. Las áreas típicas de aplicación son modelación, caracterización y diseño de dispositivos, circuitos y sistemas; diseño de herramientas, instrumentos y equipos; diseño de estructuras y edificaciones; control de procesos, ajuste de curvas, solución de sistemas de ecuaciones; pronósticos, scheduling, control de calidad, entre muchas otras.[30].

La mayoría de los problemas reales tienen varias soluciones, y ocasionalmente, un número infinito de soluciones pueden ser posibles. Asumiendo que el problema admite más de una solución, la optimización se puede lograr mediante la búsqueda de la mejor solución en términos de algún criterio de desempeño. Si el problema admite solamente una única solución, entonces, la optimización no puede ser aplicada. [30].

Varios enfoques generales de optimización están disponibles, ellos son:

- Métodos analíticos
- Métodos gráficos
- Métodos experimentales
- Métodos numéricos

Los métodos analíticos, se basan en las técnicas clásicas de cálculo diferencial. En estos métodos, el máximo o mínimo de un criterio de rendimiento es determinado al encontrar los valores de los parámetros que causan que la derivada de con respecto a asuma valores de cero. El problema a ser resuelto, debe obviamente ser escrito en términos matemáticos antes de que las reglas de cálculo puedan ser aplicadas.

Los métodos gráficos, pueden ser utilizados para graficar la función a ser maximizada o minimizada si el número de variables no excede dos. Si la función depende de una única variable, , el gráfico de inmediatamente revelará el máximo o mínimo de la función. Similarmente, si la función depende de dos variables, , un conjunto de contornos puede ser construido. Un contorno es un conjunto de puntos en el plano para el cual es constante. Así, un mapa de contornos, como un mapa topográfico de una región específica, revelará picos y valles de la función. Desafortunadamente, el método gráfico es de limitada utilidad debido a que en la mayoría de las aplicaciones prácticas la función a ser optimizada depende de varias variables, usualmente más de cuatro.

Por otro lado, el rendimiento óptimo de un sistema puede algunas veces ser alcanzado por experimentación directa. En este método, el sistema es configurado y las variables del proceso son ajustadas una por una y el criterio de rendimiento es medido en cada caso. Éste método puede conducir a condiciones de operación óptima, o casi óptimas. Sin embargo, también puede conducir a resultado no confiables, debido a que en ciertos sistemas dos o más variables interactúan entre sí, y deben ser ajustadas simultáneamente para alcanzar el criterio de rendimiento óptimo.

Finalmente, los métodos numéricos son considerados como los más importantes entre los mencionados. En éste enfoque, los procedimientos iterativos numéricos se utilizan para generar una serie de soluciones para mejorar progresivamente el problema de optimización, iniciando con una estimación inicial de la solución. El proceso finaliza cuando algún criterio de convergencia es satisfecho.[30].

3.13. El problema de optimización.

Los problemas de optimización se dividen naturalmente en dos categorías: Aquellos con variables continuas y otras con variables discretas, los cuales son llamados combinatorios. En los problemas continuos, se busca un conjunto de números reales, e incluso funciones; en los problemas combinatorios se busca un objeto de un conjunto finito, o infinito contable, usualmente un entero, un conjunto, una permutación o un grafo. Estos dos tipos de problemas, generalmente tienen diferentes formas, y los métodos para resolverlos han llegado a ser bastante divergentes[31].

En general, un problema de optimización puede ser definido como sigue:

Una instancia de un problema de optimización es un par (F, c) , donde F es cualquier conjunto, el dominio de los puntos factibles; c es la función de costo.

(1)

El problema es encontrar un f para el cual $c(f) \leq c(x)$ para todo $x \in F$. Tal punto f es llamado solución óptima global, o simplemente, solución óptima.[31].

Sin embargo, antes de optimizar, el problema debe ser apropiadamente formulado. Un criterio de desempeño F debe ser derivado en términos de n parámetros como:

(2)

F es una cantidad escalar, la cual asume numerosas formas. Puede ser el costo de un producto en un ambiente de manufactura o la diferencia entre el rendimiento

deseado y el rendimiento actual en un sistema. Las variables son los parámetros que influyen sobre el criterio de desempeño F . Éstas, pueden ser variables independientes, como el tiempo, o parámetros de control que pueden ser ajustados [30].

A continuación se proporciona una definición alternativa de un problema básico de optimización:

El problema más básico de optimización es ajustar las variables de tal manera que se minimice la cantidad F . este problema, puede ser matemáticamente descrito como:

(3)

La función objetivo, F , puede depender de un gran número de variables, algunas veces 100 o más. Para simplificar la notación, la notación matricial es usualmente empleada. En muchas ocasiones, el problema consiste en encontrar el máximo de la función objetivo, entonces:

(4)

Donde es un vector columna con los elementos .

3.14. Optimización multiobjetivo.

En la sección anterior se definió el problema básico de optimización. Es de notar, que en dicha definición solo se tuvo en cuenta una única función a optimizar. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones y problemas reales suelen tenerse dos o más funciones objetivos que se desean o se deben optimizar, las cuales generalmente se encuentran en conflicto. Este tipo de problemas, se denomina optimización multiobjetivo o multicriterio; y tienen la particularidad de que no poseen una única solución al problema, sino un conjunto de soluciones válidas (cada una de ellas puede ser considerada una solución al problema). Ello se debe a que ninguna de las soluciones domina (es mejor) que las demás en todas las funciones objetivos que componen el problema. [32].

Es el problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga las restricciones y optimice una función vectorial cuyos elementos representen las funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de criterios de desempeño que están usualmente en conflicto entre sí. Por lo tanto, el término optimizar significa encontrar aquella solución que dará un valor aceptable al diseñador en todas las funciones objetivo[32].

|

Un problema de optimización multiobjetivo (MOP) es un proceso de búsqueda simultánea de soluciones óptimas, o cercanas al óptimo, dadas algunas funciones objetivos conflictivas. Formalmente, un MOP consiste en maximizar/minimizar el vector función:

$$(5)$$

Sujeto a J restricciones de desigualdad y K restricciones de igualdad, así:

$$(6)$$

$$(7)$$

Donde \mathbf{x} es el vector de variables de decisión y \mathbf{S} es el espacio de búsqueda.[33].

Cuando se tiene un problema de optimización mono-objetivo, el óptimo corresponde al punto, o conjunto de puntos, que obtienen el mejor valor (máximo/mínimo) de F , considerando el espacio completo de búsqueda. Sin embargo, para varias funciones objetivos la noción de solución óptima es diferente, porque el objetivo es hallar una buena frontera de soluciones entre las funciones objetivos. En este caso, la noción de optimalidad más comúnmente adoptada es la optimalidad de Pareto.

A continuación se presentan algunos conceptos, que facilitarán la comprensión del concepto de Optimalidad de Pareto:

3.15. Conjunto de Pareto.

Para cada valor de λ dado en la función objetivo, se obtiene un conjunto de modelos, en cada uno de los cuales, el valor de λ , que maximiza el f_1 no minimiza el f_2 , por lo tanto se debe buscar el conjunto eficiente (no dominado u óptimo de Pareto). En este caso no se busca una solución óptima, sino un conjunto de soluciones eficientes. Una solución es eficiente si no existe otra solución factible que mejore el valor de un objetivo sin causar una disminución en el valor de alguno de los restantes objetivos.

3.16. Dominancia de Pareto.

Suponga un problema con m funciones objetivos f_1, f_2, \dots, f_m las cuales deben ser minimizadas.

Se dice que una solución x^* domina a una solución x (denotado como $x^* \succ x$) sí y sólo si $f_i(x^*) < f_i(x)$ para al menos un i y $f_j(x^*) \leq f_j(x)$ para todos los j . Es decir, se dice que la solución x^* domina a la solución x si x^* es menor o igual a x en todos los objetivos, y estrictamente menor en al menos uno de ellos.

3.17. Óptimos de Pareto.

Se dice que x^* es una solución óptima de Pareto sí y solo si x^* no es dominada por ninguna otra solución. Es decir, la solución x^* es óptima de Pareto si no existe ninguna otra solución que la domine.

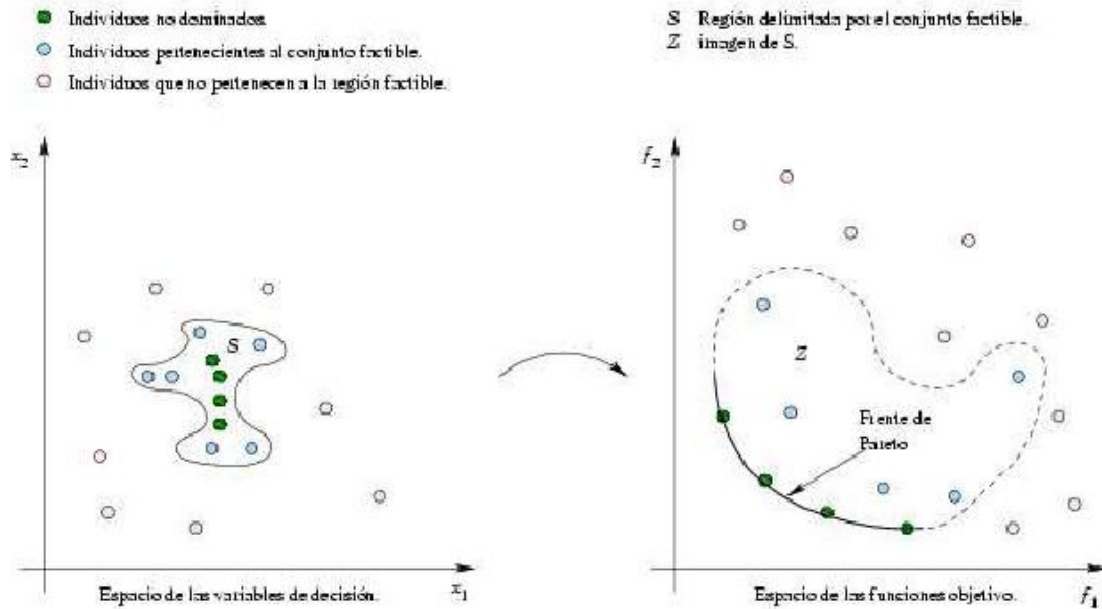
3.18. Conjunto Óptimo de Pareto.

Es el conjunto P de todas las soluciones óptimas de Pareto. Éste conjunto abarca todas las soluciones que no son dominadas por ninguna otra. Cabe anotar, que las soluciones que pertenecen a este conjunto tampoco son dominadas entre sí, por lo cual se llaman soluciones no dominadas y conforman el conjunto de mejores soluciones al problema.

3.19. Frontera de Pareto.

Es el conjunto F de los valores de las funciones objetivo de todas las soluciones óptimas de Pareto. [33].

Ilustración 12. Frontera de Pareto



En la ilustración 24 parte izquierda se observan las soluciones óptimas de Pareto (verdes), y en la derecha se observa la Frontera de Pareto. La primera corresponde al espacio de las variables de decisión, mientras que la segunda corresponde al espacio de las funciones objetivos.

3.20. Metaheurísticas.

El término metaheurística se obtiene de anteponer a heurística el sufijo *meta*, el cual significa “más allá” o “a un nivel superior”. Éstas, son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento[34].

Por su parte, Osman (1995), define: “Dentro de la clase denominada metaheurística se incluyen todos aquellos procedimientos que en un proceso iterativo, guían a una heurística subordinada combinando inteligentemente diferentes conceptos tomados de la analogía de la naturaleza, y exploran el espacio de soluciones utilizando estrategias de aprendizaje para estructurar la información, con el objeto de encontrar eficientemente soluciones cercanas al óptimo”.

El término metaheurística apareció por primera vez en el artículo seminal de Fred Glover acerca Búsqueda Tabú en 1986. A partir de entonces, se han publicado gran cantidad de artículos e investigaciones sobre procedimientos que intentan resolver ciertos problemas, que luego son generalizados, convirtiéndose así en

|

metaheurística. De esta manera Glover concibe a las metaheurística como un proceso maestro de alto nivel que guía y modifica a otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimalidad local [34].

Por otra parte [35] expresan que una de las definiciones más descriptivas a cerca de metaheurística es la presentada por J.P. Kelly, que se puede enunciar del siguiente modo: “Las metaheurísticas son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria en los que las heurísticas clásicas no son efectivas. Las metaheurística proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos.”

3.21. Clases de metaheurística.

Los tipos de metaheurística se establecen, en función al tipo de procedimientos a los que se refiere. Así, algunos de los tipos fundamentales de metaheurística son: metaheurística para métodos de relajación, procesos constructivos, procesos de búsqueda por entornos y procedimientos evolutivos[34].

3.21.1. Metaheurística de Relajación.

Se refieren a procedimientos de resolución de problemas que utilizan relajaciones del modelo original, es decir, modificaciones del modelo que hacen al problema más fácil de resolver, cuya solución facilita la solución del problema original. Al elaborar el modelo que representa un problema real, se deben buscar las técnicas adecuadas que solucionen tal modelo. En ocasiones éstos modelos, debido a la complejidad, son muy difíciles de resolver por lo cual deben ser modificados para encontrar modelos más sencillos, cuya solución es más fácil de hallar o cuyos métodos de solución resultan más eficientes. El término relajación se entiende aquí como transformar un modelo complejo, que representa un problema real, en un modelo más fácil de solucionar mediante las técnicas correspondientes de solución del problema. La relajación se obtiene al debilitar, eliminar o modificar las restricciones u objetivos del problema.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta es que las buenas relajaciones son las que simplifican el problema y hacen más eficientes los procedimientos de solución, pero cuya resolución proporcione muy buenas soluciones del problema original. En otras palabras, la relajación no solo consiste en transformar el modelo real en uno más fácil de resolver sino también en hallar una solución al modelo relajado que se aproxime lo suficiente a la solución del modelo real. Entre las

|

metaheurísticas de relajación tenemos los métodos de relajación lagrangiana o de restricciones subordinadas.

3.21.2. Metaheurísticas Constructivas.

Se orientan a los procedimientos que tratan de la obtención de una solución a partir del análisis y selección paulatina de las componentes que la forman. Las heurísticas constructivas aportan soluciones al problema por medio de un procedimiento que incorpora iterativamente elementos a una estructura, inicialmente vacía, que representa a la solución. Éste tipo de metaheurísticas establecen estrategias para seleccionar las componentes con las que se construye una buena solución del problema. Entre las metaheurísticas primitivas en este contexto se encuentra la popular estrategia voraz o greedy, que implica la elección que da los mejores resultados inmediatos, sin tener en cuenta una perspectiva más amplia.

3.21.3. Metaheurísticas de Búsqueda.

Guían los procedimientos que utilizan transformaciones o movimientos para recorrer el espacio de soluciones alternativas y explotar las estructuras de entornos asociadas. Según [34], este tipo de metaheurísticas son las más importantes debido a que establecen estrategias para recorrer el espacio de soluciones del problema transformando de forma iterativa las soluciones iniciales generadas aleatoriamente o por algún algoritmo de inicialización. Las búsquedas evolutivas se distinguen de éstas en que es un conjunto de soluciones, generalmente llamado *población de búsqueda*, el que evoluciona sobre el espacio de búsqueda.

Las metaheurísticas de búsqueda aportan estrategias para afrontar la resolución de un problema realizando una búsqueda sobre un espacio cuyos elementos representan las soluciones candidatas alternativas. La representación de las soluciones se realiza a través de una codificación que incluya toda la información necesaria para su identificación y evaluación. Una búsqueda sobre un espacio consiste en generar una sucesión de puntos del espacio pasando de uno a otro por medio de una serie de transformaciones o movimientos. Un procedimiento de búsqueda para resolver un problema de optimización realiza recorridos sobre el espacio de las soluciones alternativas y selecciona la mejor solución encontrada en el recorrido. Las metaheurísticas de búsqueda proporcionan pautas para obtener recorridos que, con alto rendimiento, proporcionen soluciones de alta calidad.

Dentro de las metaheurísticas de búsqueda se pueden considerar dos categorías: Metaheurísticas de Búsqueda Local y Metaheurísticas de Búsqueda Global. La

|

búsqueda local es la que basa su estrategia en el estudio de soluciones del vecindario o entorno de la solución que realiza el recorrido. Éste tipo de metaheurísticas identifican cuáles son las soluciones que intervienen en el análisis local y, luego, eligen iterativamente la mejor de tales soluciones mientras exista alguna mejora posible. Sin embargo, este tipo de metaheurísticas presentan el inconveniente de que son muy susceptibles a quedarse atrapadas en óptimos locales debido a que sólo modifican la solución mediante una mejora en su propio entorno. Por su parte, las metaheurísticas de búsqueda global no son más que estrategias para tratar de evitar los óptimos locales de baja calidad. Algunos de los mecanismos empleados para ello son: Volver a iniciar la búsqueda desde otra solución de arranque, modificar la estructura de entornos que se esté aplicando y, finalmente, permitir movimientos o transformaciones de la solución de búsqueda que no sean de mejora.

3.21.4. Metaheurísticas Evolutivas.

Están enfocadas a los procedimientos basados en conjunto de soluciones que evolucionan sobre el espacio de soluciones. Las metaheurísticas evolutivas establecen estrategias para conducir la evolución en el espacio de búsqueda de conjuntos de soluciones (usualmente llamados poblaciones) con la intención de acercarse a la solución óptima con sus elementos. El aspecto fundamental de las heurísticas evolutivas consiste en la interacción entre los miembros de la población frente a las búsquedas que se guían por la información de soluciones individuales. Las diferentes metaheurísticas evolutivas se distinguen por la forma en que combinan la información proporcionada por los elementos de la población para hacerla evolucionar mediante la obtención de nuevas soluciones.

Cabe anotar, que algunas metaheurísticas han surgido de la combinación de varias metaheurísticas de diversos tipos, así como hay otras, que no se incluyen claramente en ninguno de los tipos antes mencionados[34].

E.A Silver (1980) y Zanakis (1989), proponen otros tipos de metaheurísticas, que no son más que tipos intermedios entre las antes nombradas [34]. Las más destacadas son:

3.21.5. Metaheurísticas de descomposición.

Establecen pautas para resolver un problema determinando sub-problemas a partir de los que se construye una solución del problema original. Se trata de metaheurísticas intermedias entre las de relajación y construcción, ya que se refieren básicamente a las características que se pretenden obtener en los sub-problemas y a cómo integrar las soluciones de éstos en una solución del problema original. El objetivo fundamental es obtener sub-problemas significativamente más

|

fáciles de resolver que los originales, y cuyas soluciones puedan ser utilizadas efectivamente.

3.21.6. Metaheurística de Memoria a Largo Plazo.

Se sitúan entre las metaheurística de arranque múltiple y las derivadas de búsqueda tabú, las cuales a su vez, forman parte de las metaheurística de búsqueda.

3.21.7. Metaheurística simulado recocido.

El recocido simulado (SA)[36] es un algoritmo de optimización efectivo inspirado en una analogía entre la simulación de recocido de sólidos y la estrategia de resolver problemas de optimización combinatoria. A partir de un Estado inicial, el sistema es perturbado de forma aleatoria a un nuevo estado en el cual una vecindad original cambia y por lo tanto las soluciones que se tienen actualmente también cambiarían.

El *enfriamiento simulado* o *Simulated Annealing* (SA) es una de las técnicas más antiguas entre las metaheurísticas el cual considera una estrategia explícita para escapar de los mínimos locales. Los orígenes del algoritmo se encuentran en un mecanismo estadístico, denominado *metrópolis* [37]. La idea del SA es simular el proceso de enfriamiento del metal y del cristal. Para evitar quedar atrapado en un mínimo local, el algoritmo permite elegir una solución cuyo valor de la función objetivo, sea peor que el de la solución actual. En cada iteración se elige, a partir de la solución actual s , una solución s_0 del vecindario $N(s)$. Si s_0 es mejor que s (es decir, tiene un mejor valor en la función objetivo), se sustituye s por s_0 como solución actual. Si la solución s_0 es peor, entonces es aceptada con una determinada probabilidad que depende de la temperatura actual T y de la diferencia de la *función objetivo* entre ambas soluciones, $f(s_0) < f(s)$ (caso de minimización).

3.21.8. Enjambre de partícula PSO.

La metaheurística de Optimización de Enjambre de Partículas o PSO por sus siglas en inglés (*Particle Swarm Optimization*), fue desarrollada por Kennedy y Eberhart en 1995, está inspirada en el comportamiento social observado en grupos de individuos tales como parvadas de pájaros, enjambres de insectos y bancos de peces. Tal comportamiento social se basa en la transmisión del suceso de cada individuo a los demás individuos del grupo, lo cual resulta en un proceso sinérgico que permite a los individuos satisfacer de la mejor manera posible sus

necesidades más inmediatas, tales como la localización de alimentos o de un lugar de cobijo.

Cada ave, llamada partícula, vuela por el espacio de la solución del problema de optimización en la búsqueda de la solución óptima y por lo tanto su posición representa, una posible solución al problema. En la terminología del PSO, las soluciones disponibles en cada iteración se llaman el enjambre, que es equivalente a la población, en algoritmos genéticos. Es un algoritmo basado en nubes (también enjambre o cúmulos) de partículas, este se aplica en diferentes campos de investigación para la optimización de problemas complejos. El PSO es un sistema multiagente, las partículas son agentes simples que se mueven por el espacio de búsqueda, guardan y posiblemente comunican la mejor solución que han encontrado. El movimiento de las partículas por el espacio está guiado por las partículas que tienen la mejor solución del momento. [38].

En líneas generales, el algoritmo busca encontrar el óptimo global de una función (Función Fitness) mediante el movimiento de un conjunto de “partículas” (enjambre) en un espacio definido por el número de parámetros de la función. Cada partícula es una posible solución, es decir, un conjunto de parámetros, que se “evalúa” calculando el valor del objetivo que les correspondería en dicho movimiento, las partículas utilizan información histórica (el resultado de su exploración pasada), así como información sobre sus vecinos (otras partículas del enjambre)[39].

Por lo tanto dado un espacio N-dimensional, cada partícula i del enjambre conoce su posición actual p_{id} ; la velocidad v_{id} ; con la cual ha llegado a dicha posición y la mejor posición p_{best} en la que se ha encontrado, denominada mejor personal.

El vector de posición codifica una solución al problema de optimización, de modo que cada coordenada corresponde al valor de uno de los parámetros de la función que se desea optimizar.

En cada iteración, la velocidad de cada partícula se actualiza utilizando la siguiente ecuación:

$$(8)$$

De donde

Tabla 11. Definición de variables

R^D	El espacio de búsqueda designado, con D la cantidad de dimensiones que cuenta dicho espacio
p_{id}	El valor del mejor fitness hasta este momento

	encontrado. Es el valor que se obtiene al aplicar la función de fitness a cada partícula
p_{gd}	Es la mejor posición del grupo de partículas en la dimensión d del vector posición.
	La posición de la i-ésima partícula en R^D
	La velocidad de la partícula i-ésima en R^D
	La mejor posición anterior (la posición que dio el mejor resultado) de la partícula i-ésima.
$v_{id}(t)$	Velocidad de la i-ésima partícula en la dimensión d para un tiempo t
$x_{id}(t)$	Posición actual de la partícula i-ésima en la dimensión d
r_1 y r_2	Números independientes al azar distribuidos uniformemente en el rango [0, 1]
ϕ_1 y ϕ_2	Constantes llamadas coeficientes de aceleración,
Ω	Coeficiente de inercia ver (3.6)

Fuente: [40],[41]

Por lo tanto, la posición de cada partícula se actualiza en cada generación de acuerdo a la ecuación (9).

(9)

En el PSO estándar, la ecuación (8) se utiliza para calcular la nueva velocidad de acuerdo a su velocidad anterior y la distancia de su posición actual desde su mejor posición histórica y la mejor posición de sus vecinos. Generalmente, el valor de cada componente en V_i se pueden sujetar al rango $[-v_{max}, v_{max}]$ para controlar la itinerancia excesiva de partículas fuera del espacio de búsqueda. Entonces, la partícula vuela hacia una nueva posición, según la ecuación (9). Este proceso se repite hasta que un usuario definido por el criterio de parada es alcanzado.

El procedimiento estándar de PSO se resume de la siguiente manera:

Paso 1: Inicializar una población de partículas con posiciones y velocidades aleatorias en un espacio D-dimensional.

Paso 2: Evaluar los valores objetivos de todas las partículas. Hacer p_{best} igual a la partícula (tanto en posición como en fitness), y dejar g_{best} como la mejor partícula encontrada tanto en su posición como en valor objetivo.

Paso 3: Actualizar la velocidad y la posición de cada partícula de acuerdo a las ecuaciones (8) y (9).

Paso 4: Evaluar los valores objetivos de todas las partículas.

Paso 5: Para cada partícula se compara su fitness con el valor objetivo de su pbest. Si el valor objetivo de la partícula actual es mejor, se actualiza pbest y su valor objetivo con la posición y el fitness de la partícula que se está revisando.

Paso 6: Determinar la mejor partícula del enjambre actual (comparando fitness). Si el valor objetivo es mejor al del gbest, actualice gbest y su valor objetivo con la posición y el y el fitness de la mejor partícula actual.

Paso 7: Si no se cumple con el criterio de parada, vaya al paso 3. De lo contrario muestre como salida el gbest y su valor objetivo

3.21.9. Metaheurística híbrida.

El punto a considerar es el gran número de parámetros y la forma de calcular estos parámetros es aquí donde entra la metaheurística híbrida. El problema de encontrar un conjunto de parámetros para F es muy complejo, y los métodos alternativos para obtener estos parámetros es de gran interés en los estudios de series de tiempo. Cuando se trata de modelos no lineales, dos métodos suelen ser sugeridos. El primero busca desarrollar métodos exactos para obtener los parámetros óptimos para el modelo. El segundo trata de encontrar una solución "casi óptima" del grupo de parámetros mediante los procedimientos metaheurísticos [42]. Debido a la complejidad del problema, el segundo método es el más atractivo debido a que en los procedimientos metaheurísticos los parámetros no requieren de supuestos y ofrece la posibilidad de obtener un óptimo global. En este artículo se decide trabajar con un híbrido entre la metaheurística enjambre de partículas (PSO) y simulado recocido (SA) ya que se encuentra que se han obtenido muy buenos resultados con estos algoritmos en muchos problemas de optimización combinatoria. Lo que se hace es combinar los mejores procedimientos de búsqueda de ambos algoritmos para explorar a un más el espacio de soluciones factibles.

3.21.10. Ajuste de parámetros del PSO híbrido.

Los parámetros de PSO se establecen con base en lo propuesto por [40]. Las constantes de aceleración y se establecen en 2 y la población inicial de enjambre se establece en 100. El coeficiente de inercia determina el comportamiento de búsqueda del algoritmo, cuando toma valores grandes facilita la búsqueda de nuevas ubicaciones, mientras que los valores pequeños proporcionan una búsqueda más fina en la zona actual. El equilibrio entre exploración global y local se puede alcanzar al disminuir el coeficiente de inercia

durante la ejecución del algoritmo. Este procedimiento hace que PSO tienda a tener más capacidad de búsqueda global al principio y más capacidad de búsqueda local hacia el final. Para fijar el coeficiente de inercia se usa la siguiente función.

$$— (10)$$

Donde es el punto de partida, es el punto final de los valores de la inercia. y toma valores de 1,5 y 0,3, respectivamente. Además, x muestra el número de la iteración actual y h muestra el número máximo de iteración que se establece como 15000. La constante entera α se utiliza para manipular el gradiente de ω exponencialmente decreciente y se establece como 4. La velocidad mide la rapidez con que el enjambre se mueve en la iteración determinada, y es definida como el promedio de velocidad absoluta. Se muestra el comportamiento del enjambre en movimiento y mayor velocidad significa que el enjambre se mueve agresivamente en el movimiento a través del espacio del problema. Por computación de la ecuación (9), el valor absoluto de v_{id} puede ser grande. Por lo que la partícula puede sobrepasar el espacio del problema. Por lo tanto, v_{id} debe limitarse a la velocidad máxima; que es un parámetro especificado por el usuario. v_{max} sirve como un obstáculo para el control de la capacidad global de exploración de un enjambre de partículas. En este trabajo, v_{id} se limita a $[-4,4]$ en el que $v_{max} = 4$ es la distancia de movimiento máximo en un solo paso.

3.22. Prueba de Shapiro & Wilk.

Prueba el siguiente juego de hipótesis[43].

H_0 : las observaciones siguen una distribución normal

H_1 : las observaciones no siguen una distribución normal

Para ello se siguen los siguientes pasos:

Ordenar en forma ascendente las j observaciones para la variable que se estudia.

$$\text{Calcular} (11)$$

$$\text{Si } j \text{ es par, } j = 2k, \text{ calcular} (12)$$

Si j es impar, $j = 2k + 1$, entonces se omite la mediana de los datos y se calcula el valor de b de acuerdo a la ecuación (12).

Calcular el valor de W , el estadístico de prueba:

 (13)

Comparar W_{cal} con el valor de W_{tab} (los valores de W_{tab} se presentan tablas). Si W_{cal} es menor que W_{tab} se rechaza la hipótesis de normalidad de los datos. Si se compara con un valor p teórico digamos de 0.05, se dice que se rechaza la hipótesis de normalidad de los datos si p –value calculado es menor que el valor teórico.

3.23. Prueba de Durbin-Watson.

La auto correlación se define como la correlación existente entre los miembros de una serie de observaciones ordenadas en el tiempo o en el espacio.

Esta prueba se usa para detectar si hay correlación, es decir esto prueba las siguientes hipótesis:

Para efectuar esta prueba se usa el siguiente estadístico (Alonso y Rivera, 2010):

 (14)

Se rechaza H_0 si $D < D_L$, donde D_L se obtienen de la tabla Durbin-Watson.

3.24. Gráficos Cuantil-Cuantil.

Permiten comparar la distribución de un conjunto de datos con: la de otro conjunto de datos, una distribución ideal teórica. Si los dos conjuntos de datos tienen la misma distribución el gráfico cuantil-cuantil es lineal.

3.25. Variables Dummy.

Una variable Dummy es una variable numérica utilizada en el análisis de regresión para representar a los subgrupos de la muestra en su estudio.

En el diseño de la investigación, una variable Dummy se utiliza a menudo para distinguir los diferentes grupos de tratamiento.

(15)

Debido a que x es 1 cuando la observación cae en el correspondiente nivel y cero en otro caso, las x 's se describen como variables (0, 1), y como ellas son verdaderas variables en el sentido estricto de regresión, son llamadas variables Dummy.

A pesar de todo, los procedimientos formales de regresión se llevan a cabo con consecuencias de gran interés. El modelo matemáticamente sería de la forma:

(16)

En la ecuación (16) β , refleja el cambio en la variable dependiente. Y como resultado de un cambio de una unidad en la variable independiente X . Esta interpretación de la pendiente (β) en la regresión lineal es apropiada solo cuando la variable dependiente es continua (cuantitativa), pero las variables explicativas en un modelo de regresión pueden ser de tipo cuantitativas o cualitativas. Por lo anterior necesitamos construir modelo que incorporen variables explicativas categóricas, para lo cual se requiere crear variables que nos sirvan para representar los diferentes niveles de la variable. La forma más usual para incorporar el efecto de una variable explicativa cualitativa en un modelo de regresión lineal es mediante la creación de las llamadas variables ficticias o Dummy para representar el efecto de la variable.

4. DISEÑO METODOLOGICO

El diseño de la investigación empleado para alcanzar los objetivos del presente proyecto es de tipo no experimental, ya que las variables que pueden afectar el rendimiento del algodón no son manipuladas pero si medidas, ya que como señala[44]. “La investigación no experimental o ex post-facto es cualquier investigación en la que resulta imposible manipular variables o asignar aleatoriamente a los sujetos o a las condiciones”, de igual forma,[2] manifiesta que “La investigación no experimental es investigación sistemática y empírica en la que las variables independientes no se manipulan porque ya han sucedido. Las inferencias sobre las relaciones entre variables se realizan sin intervención o influencia directa y dichas relaciones se observan tal y como se han dado en su contexto natural”.

Ahora, debido a que la investigación se centra en analizar cuál es el nivel o estado de una o diversas variables en un momento único, o bien cuál es la relación entre un conjunto de variables en un punto en el tiempo y su objetivo es describir relaciones entre dos o más variables en un momento determinado, el diseño de investigación es de tipo no experimental transeccional correlacional [2]

4.1. Propuesta de modelo de regresión.

El artículo en el que se basa esta investigación, introduce una nueva serie de tiempo para pronósticos, basada en un modelo de regresión no lineal que tiene una gran flexibilidad para adaptarse a cualquier cantidad de datos sin tener en cuenta supuestos anteriores sobre el comportamiento real de los datos y sobre la función objetivo. La propuesta del modelo de regresión hecha por ([45],[40]), se utiliza en forma generalizada para alcanzar el ajuste más adecuado para los datos. El objetivo principal de la regresión es encontrar la mejor para una serie de datos en la que Y es la variable dependiente medida por la experiencia y X es la variable independiente. F es un función para describir la relación entre X e Y , que consiste en una o más parámetros y ε_i es el error de observación i -ésima de nivel medio de datos que tiene una distribución normal con media cero([46],[40]).

El esquema general del modelo propuesto es el siguiente[40].

$$(17)$$

|

Donde los parámetros del modelo son: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, \dots, b_8; a_1, a_2, a_3, \dots, a_8, c_1, c_2$ y c_3 .

Para evaluar el mejor modelo que relaciona la variables rendimiento con las variables de entrada y las aplicadas durante el proceso de desmote, se tomo como funcion objetivo la cobinacion del λ y el indice R^2 a partir de la cual se obtiene el conjunto de Pareto. El modelo matematico que ha utilizado para tal efecto es el siguiente.

(18)

Sujeto a:

(19)

(20)

Donde λ tomara los siguientes valores:

(21)

Dw: Prueba de independecia de **Durbin-Watson**.

Sw: Prueba de normalidad de **Shapiro & Wilk**. ().

—

La anterior expresion es conocida como el cuadrado medio del error y es un estimador insesgado de la varianza de los errores

—
— (22)

—
— (23)

Este criterio, toma valores entre 0 y 1, mientras más cercano este a cero indica que el ajuste de los datos es mejor, por lo tanto nos da un mejor Fitness.

(24)

El coeficiente múltiple de determinación R^2 es una medida que indica que también se ajusta el modelo a los datos. Un ajuste perfecto daría como resultado $R^2 = 1$ y un ajuste muy bueno daría como resultado un valor cercano a 1. y un ajuste muy pobre se relaciona con un valor de R^2 cercano a cero.

(25)

Donde:

n = tamaño de la muestra.

K = número de variables independientes.

Cuando se utiliza el Coeficiente de Correlación múltiple al Cuadrado (R^2), se presenta el inconveniente que en la medida en que se incrementa el número de variables del modelo mayor será el valor de R^2 , por la anterior razón es recomendable utilizar el coeficiente de determinación ajustado

4.2. Variables de diseño.

Las variables consideradas para modelar el rendimiento en la presente investigación fueron las identificadas previamente en la revisión del estado del arte y las que en estudios similares se consideran que afectan el rendimiento en el algodón fibra obtenido en el proceso de desmote. Los niveles y valores para cada variable se seleccionaron de acuerdo con los que entran al lote a la desmotadora y las condiciones con las que fue desmotado, en ninguna fase del proceso se manipularon los valores de las variables con el fin de analizar comportamientos.

A continuación se describen cada una de las variables que se tuvieron en cuenta para el presente estudio.

4.2.1. Variedad (OPAL, DP164 y M123)

Hace referencia al Grupo genético al que pertenece el lote de algodón que ingresa al proceso, dado por el nombre comercial de la semilla. Esta variable es considerada en la presente investigación como una variable binaria es decir toma valores de cero o uno. Se considera no controlable dentro de la investigación puesto que esta la puede controlar el agricultor. Las variables objeto de análisis son: OPAL, DP164 y M123

4.2.2. Humedad (HE).

Es la cantidad de humedad expresada en términos de porcentaje (%), presente en el algodón momentos previos al proceso de desmote. Esta es medida mediante un Higrómetro. Se tomaron como valores referencia para esta variable un rango entre 12% y 20% de humedad, porque son los valores que mayores se repitieron durante la cosecha. Es de aclarar que hubo lotes que ingresaron con niveles minimos de humedad. El nivel de humedad con el que ingresa el lote a la desmotadora puede ser bajado en la planta, dejando el lote un tiempo hasta que llegue a los niveles aptos para el desmote, pero este procesos poco se aplica porque el agricultor desea que sus algodones sean desmotados en el menor tiempo posible y las desmotadoras no poseen alta capacidad de almacenamiento

4.2.3. Materia Extraña (MEA, MEB y MEC).

Es cualquier sustancia presente algodón distinta al mismo como lo son: hojas, cacota, tabaquillo, palos, pasto, entre otros. Esta se clasifica en tres niveles:

- **Tipo A (MEA).** Bajo contenido de materias extrañas. Algodón relativamente limpio.
- **Tipo B (MEB).** Contenido apreciable de materias extrañas, básicamente hojas y cacota. Algodón sucio.
- **Tipo C (MEC)** alto contenido de materia extraña grande y pequeña, como hojas, tabaquillo, cacota y pasto. Algodón muy sucio.

Es considerada una variables binaria para la presente investigacion y es controlada directamente por el agricultor.

4.2.4. Aplicación de limpia-fibras (NLF).

Es la cantidad de limpia-fibras utilizada en la etapa de limpieza después de la etapa de desmote. La configuración que tienen los limpia-fibras es de uno por cada cuerpo de desmotadora (Configuración en paralelo), esta variable se medirá como el numero de limpia fibras aplicados. Esta variables toma valores de 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

4.2.5. Temperatura de secado durante el proceso (TP)

Es la temperatura medida en grados centígrados (°C), en el tubo de aire caliente de secado y transporte que lleva el algodón desde el control de alimentación hasta

|

la torre de secado. Esta temperatura es medida con un termómetro ubicado al interior del tubo de secado. Es controlada por el técnico de desmote

4.3. Variable respuesta rendimiento (rend).

La variable respuesta en la presente investigación es el rendimiento (% de fibra), que se desea estudiar bajo la incidencia de las variables independientes anteriormente descritas. Es el porcentaje de fibra que se obtiene luego de desmotar un lote de algodón y se mide como peso de la fibra obtenida entre el peso total del lote sin desmotar.

Los datos para las variables: variedad, humedad, materia extraña, aplicación de limpia-fibras y temperatura de secado, se recolectaron según lo registrados por los equipo de medición y las condiciones de operación que para cada lote definió el técnico de desmote.

Los datos para la variable rendimiento (porcentaje de fibra) se obtuvieron de los registros de control de desmote que arroja el software de manejo de la producción en la planta desmotadora.

4.4. Proceso de toma de datos.

La información sobre las condiciones de entrada de cada lote, se toma en el momento en que esté ingresa a la planta, mediante registro computarizado se pesa el lote junto con el medio que transporta el lote y se saca la diferencia y ese es el peso del lote que ingresa a la planta, queda registrado la afiliación a la que pertenece, el número del lote asignado, la variedad, humedad de entrada y posteriormente la cantidad (Registro de control de entrada). Seguidamente el lote es enviado a las bodegas donde es trasvaceado e identificado por una hoja de entrada, en la cual se anota el nombre de la afiliación a la que pertenece, el número del lote y la variedad. A través de inspección se clasifica o asigna el grado de suciedad en cualquiera de sus tres niveles, lotes limpios(A), sucios(B) y, muy sucios(C).

Momentos previos al procesamiento del lote, el técnico de desmote, inspecciona las bodegas y observa el contenido de materia extraña de los lotes, mide nuevamente la humedad y decide los parámetros de proceso (equipo de desmote, aplicación de limpia-fibras y temperatura de secado), los cuales registra en el memorando de desmote, que es el documento oficial para desarrollar el proceso de desmote. Estos memorandos de desmotes son la receta de las condiciones de procesamiento de un determinado lote, el cual muestra las condiciones a las que un lote codificado debe ser desmotado, este memorando registra el código de cada lote y demás condiciones con las cuales será desmotado.

Seguido el proceso de desmote, se obtiene el producto final o pacas de algodón fibra, previamente pesadas, este dato es anotado en un Registro De Control De Desmote que especifica cuáles son los porcentajes de fibra, semillas y mermas obtenidas del determinado del lote.

Este fue el procedimiento usado para la recolección de la información del surgieron datos de un total de 707 lotes para el estudio del rendimiento, en la tabla 16, se muestran los factores que en análisis previo y la revisión bibliográfica se detecto afectan el rendimiento. Un análisis de esta tabla conduce a extraer una conclusión preliminar en el sentido que si desea obtener el rendimiento máximo (% de Fibra), el agricultor debe cultivar algodones de variedad M123, que lo ingrese a la desmotadora con un grado de humedad menores a 12%, que estén totalmente limpios, que no le apliquen limpia fibras, y la temperaturas en el cuerpo desmotador debe estar entre un mínimo de 30°C y un máximo de 50°C.

Tabla 12. Variables de diseño y sus niveles

		CASOS	PROM			CASOS	PROM
TEMPERATURA DE PROCESO	30	270	35,85	VARIEDAD	OPAL	431	35,49
	50	157	35,7		M123	80	36,94
	60	60	35,41		DP164	196	35,58
	80	112	35,56			CASOS	PROM
	110	37	35,34	NUMERO LIMPIA FIBRAS APLICADOS	0	78	37,3
	130	41	35,55		1	76	35,74
	160	30	35,59		2	0	0
		CASOS	PROM		3	0	0
MATERIAL EXTRAÑO	A	162	36,83		4	37	35,28
	B	409	35,36		5	516	35,45
	C	136	35,27		6		
		CASOS	PROM				
HUMEDAD DE ENTRADA	12	35	37,62				
	14	40	36,96				
	16	80	36,59				
	18	282	35,71				
	20	270	34,94				

Fuente: Propia

4.5. Características del modelo a fijar.

El modelo de regresión que optimizara el rendimiento en el algodón fibra, en la presente investigación se determinará mediante el modelo mostrado en la ecuación (17), que maximiza la función objetivo indicada en la ecuación (18) y que

cumple con las restricciones planteadas en las ecuaciones (19) y (20), para lo cual se programó en MatLab la metaheurística híbrida Recocido simulado y enjambre de partículas.

Con la ejecución de la metaheurística desarrollada se obtiene un modelo para cada valor de λ mostrados en la ecuación (21), es decir 14 modelos, conjunto modelos que cumplen con las restricciones planteadas en las ecuaciones (19) y (20), de donde se forma el conjunto óptimo de Pareto.

4.6. Procedimiento de la metaheurística híbrida.

El método de metaheurística híbrida se utiliza, para estimar los parámetros para el modelo de regresión que se describe en la ecuación (17). El algoritmo híbrido que se propone, combina los dos métodos enjambre de partículas y recocido simulado. Para encontrar un modelo adecuado, varias combinaciones de los parámetros pueden ser analizadas para evitar la selección inadecuada de un modelo a priori. En pocas palabras, nuestro algoritmo híbrido se puede resumir con el siguiente pseudo-código tabla 13. Como Se puede observar durante el proceso de búsqueda híbrido, PSO ofrece soluciones iniciales para recocido simulado Los dos mecanismos principales del algoritmo de la metaheurística híbrida (HMH) son los siguientes:

Mecanismo 1: Fase de Intensificación utilizando PSO. El concepto prestado por el método híbrido de metaheurística consiste en explorar continuamente el espacio de soluciones utilizando para ello un operador de búsqueda basado en PSO.

Mecanismo 2: fase de diversificación a través de una operación de PSO y SA. El componente de diversificación busca generar un conjunto de soluciones diversas que sean representativas del espacio de búsqueda. El método de diversificación consiste en generar poblaciones inicial al aleatorias para PSO. Además, en HMH un SA se aplica para la diversificación de la solución. La convergencia asintótica de SA para un óptimo global se ha probado, aunque ese resultado tiene sólo un interés teórico. Cuando cada movimiento está disponible en todas las búsquedas locales, SA ejecuta una segunda fase donde el movimiento de una solución actual a una peor está disponible pasar de la solución actual a una solución es permitido con la probabilidad dada por la expresión (26), con la expectativa de que este movimiento finalmente sea guía para una mejor solución.

Es importante señalar que la búsqueda local basada en el SA sólo se aplica a la mejor solución encontrada hasta el momento, es decir, g_{best} basado en la expresión (27). Por lo tanto, a una temperatura alta, el algoritmo realiza una exploración con una probabilidad de saltar, así como también el mejoramiento local de g_{best} , mientras que a una temperatura baja, el algoritmo hace hincapié en la explotación de g_{best} .

(26)

(27)

En la búsqueda local el esfuerzo computacional no es muy grande ya que solo se aplica a g_{best} . Después de que la búsqueda local basada en el SA se ha completado, el g_{best} de todo el enjambre debe ser actualizado si una solución de mejor calidad se encuentra durante la búsqueda local. Se puede observar que HMH no sólo se aplica a la PSO basado en el mecanismo de búsqueda evolutiva para llevar a cabo con eficacia la exploración de soluciones prometedoras dentro de toda la región, sino que también se aplica SA basado en métodos de búsqueda local para realizar la explotación para mejorar la solución.

Tabla 13. Seudocódigo

```
Inicia
Paso 1. Inicialización.
Inicializar parámetros, incluyendo el tamaño del enjambre, número máximo de
generaciones,  $x_{max}$ ;  $x_{min}$ ;  $k_1$  y  $k_2$ .
Paso 2. Estimar parámetros del modelo.
generation = 0;
Inicializar posición y velocidad de la particular estocásticamente:
Evaluar el fitness de cada particular.
Inicializar la posición del  $g_{best}$  con la particular con el fitness más bajo en el
enjambre;
Mejoramiento local de  $g_{best}$ ,
{
    Tk = Establecer temperatura _ inicial ()
    Tf = Establecer temperatura _ final ()
    S=  $g_{best}$ ;
    Mientras que la temperatura actual > Tf haga
        Genera una solución vecina S' de S;
        Si  $f(S') \leq f(S)$  entonces
            S=S';
        Sino
            aceptar S' como nueva solución con probabilidad
             $p(Tk; S'; S)$ ;
        Fin si
        Adaptar temperatura actual (Tk);
    Fin Mientras
}
Inicializar posición  $p_{best}$  con una copia de ella misma;
Mientras que (El número máximo de generaciones no se alcance) haga
```

```

{
    generation = generation+1;
    Generar siguiente enjambre por ecuaciones (8) y (9);

    Evaluar el enjambre
    {
        Computar el Fitness de cada una de las partículas;
        Encontrar el nuevo gbest y pbest por comparación;

        Actualizar gbest del enjambre y pbest de cada partícula;
    }
}

```

Paso 3. Salida de los resultados de la optimización.

Tabla 14. Variables del modelo y sus características

4.7. Parámetros y ajustes al modelo.

El modelo de referencia para la presente investigación está estructurado y definido por un número de componentes que dependen del número de variables (factores), independientes usados para predecir la variable dependiente, para este caso el modelo queda definido por 9 componente uno por cada variables, con las características especificadas en la tabla No. 15.

Tabla 15. Variables del modelo

VARIABLES		CARACTERÍSTICAS
Variedad del algodón	OPAL	Binaria
	M123	Binaria
	DP164	Binaria
Material Extraño	A	Binaria
	B	Binaria
	C	Binaria
Nivel de Humedad		Entera (12, 14, 16, 18 y 20)
Temperatura de proceso		Entera (30, 50, 60, 80, 110, 130 y 160)
Numero limpia fibras aplicados		Entera (0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6)

En total el modelo queda definido por 9 componentes, su equivalente a las 9 variables; 6 binarias y 3 enteras.

Cada componente del modelo está formado por 19 parámetros tal como se muestran a continuación:

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	c ₁	c ₂	c ₃
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

|

Los parámetros b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 y $b_5, b_6, b_7, b_8, c_1, c_2$ y c_3 toman valores aleatorios entre .

Los parámetros a_1, a_2, a_3, a_5 y a_6 toman valores aleatorios entre , tomándolo en valor absoluto para evitar la indeterminación en los calculo matemáticos.

Los parámetros a_7 y a_8 igualmente toman valores aleatorios entre .

La evaluación de la expresión en muchos casos arroja como resultado un número negativo o cero; pero los números negativos y el cero no tienen logaritmo natural en el campo de los reales. Lo que requiere tomar el valor absoluto de la expresión anterior y sumarle uno al valor absoluto de dicha expresión.

En resumen transformando el modelo referenciado a la ecuación (17) con los ajustes antes anunciados queda de la siguiente forma:

$$\text{[Empty Equation Box]} \quad (28)$$

(29)

5. RESULTADOS.

Tal como se describió en la sección 4.1, los valores que tomará la constante λ y la ejecución de la metaheurística híbrida desarrollada para determinar el modelo objeto de la presente investigación permiten obtener un modelo para cada valor de λ , en el anexo 1, se presentan los 14 modelos que arrojo la ejecución de la metaheurística, en la tabla No. 16 se indica el U_1 , el índice U_1 , la prueba de Normalidad Shapiro-Wilks, la prueba de Independencia Durbin Watson y el valor de la función objetivo obtenidas para cada modelo correspondiente a cada valor de λ .

Tabla 16. Modelos básicos

Modelo Básico	Valor de λ		U_1	$f(x)$	Normalidad Shapiro-Wilks	Independencia Durbin Watson
1	0,0000	0,4114	0,2263	0,4114	0,3383	0,4738
2	0,0500	0,3900	0,2332	0,3588	0,8951	0,5412
3	0,1000	0,4249	0,2897	0,3535	0,1383	0,9430
4	0,1500	0,4175	0,2079	0,3237	0,0504	0,5788
5	0,2000	0,4012	0,2164	0,2777	0,1497	0,4558
6	0,2500	0,4356	0,2217	0,2713	0,0905	0,7034
7	0,3000	0,3857	0,1750	0,2175	0,2017	0,7843
8	0,4000	0,3777	0,1792	0,1549	0,0513	0,7897
9	0,5000	0,3940	0,1863	0,1038	0,1899	0,6600
10	0,6000	0,2637	0,1669	0,0054	0,0684	0,5296
11	0,7000	0,1377	0,2034	-0,1011	0,0534	0,6234
12	0,8000	0,0392	0,1857	-0,1407	0,2496	0,3647
13	0,9000	0,0303	0,1640	-0,1445	0,2509	0,7349
14	1,0000	-0,0772	0,1536	-0,1536	0,0757	0,3713

Como se puede observar los 14 modelos básicos obtenidos presentan un P-valor del estadístico de prueba Shapiro-Wilks $0,0757$, por lo tanto se concluye que los residuales provienen de una distribución normal con un nivel del 95% de confianza.

La prueba de independencia de los residuales medida a través de la prueba de Durbin Watson, indica para los 14 modelos un P-valor $0,3713$, que no existe correlación (auto correlación) de los residuales ordenados en el tiempo.

En el anexo 2 se presenta al análisis gráfico realizado a los residuales estandarizados de los 14 modelos resultantes usando, para tal efecto el software statgraphics.

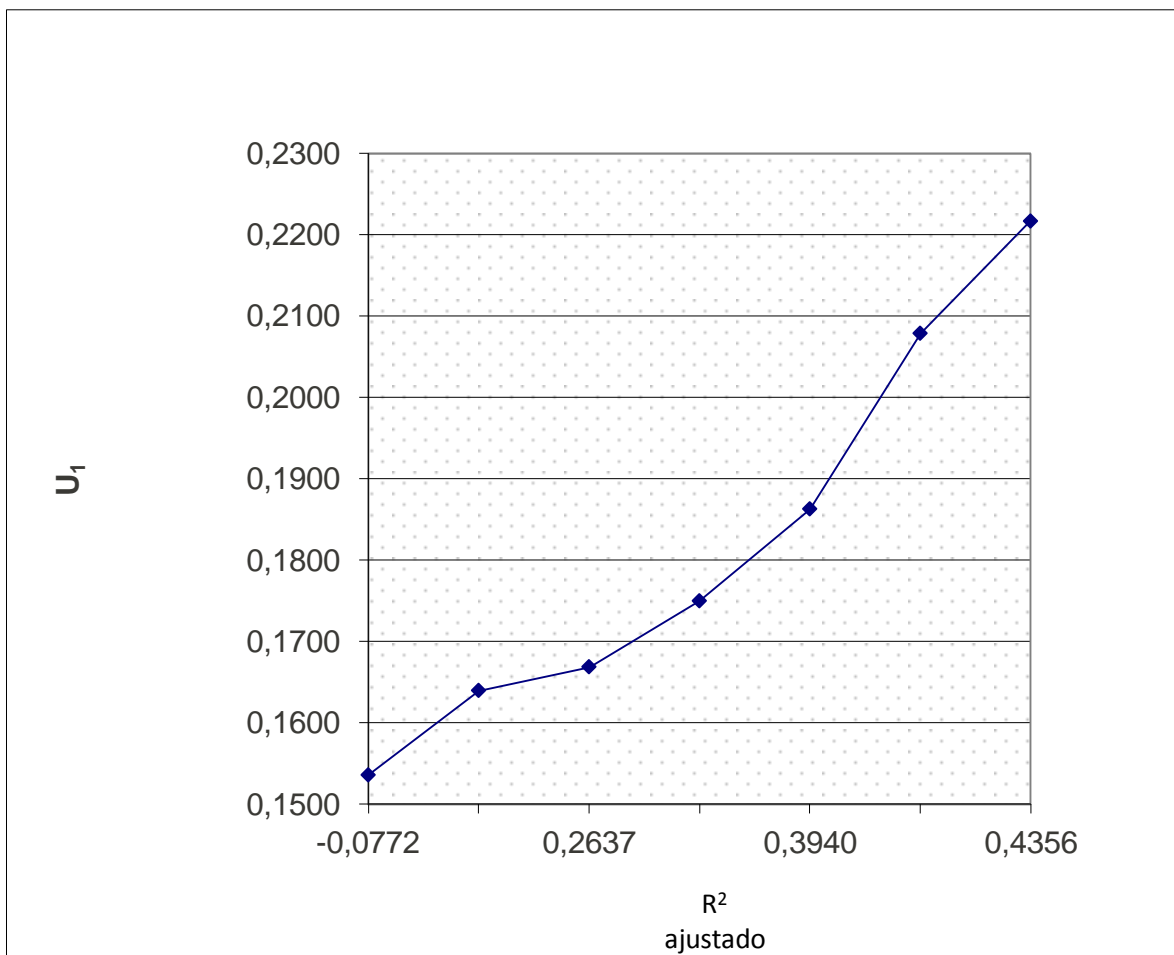
5.1. Frontera eficiente de Pareto.

Aplicado los conceptos de dominancia de Pareto, según el cual no se busca una solución óptima sino un conjunto de soluciones eficientes, es decir una solución para la cual no existe otra solución factible que mejore el valor objetivo sin causar una disminución en el valor de alguno de los restantes objetivos, a partir de estos conceptos se forma el conjunto eficiente de Pareto mostrados en la tabla No. 17 y en el gráfico No. 13.

Tabla 17. Modelos Frente de Pareto

Valor de λ	R2	U1	f(x)	Normalidad Shapiro- Wilks Valor-P	Independencia Durbin Watson Valor- P
1,0000	-0,0772	0,1536	-0,1536	0,0757	0,3713
0,9000	0,0303	0,1640	-0,1445	0,2509	0,7349
0,6000	0,2637	0,1669	0,0054	0,0684	0,5296
0,3000	0,3857	0,1750	0,2175	0,2017	0,7843
0,5000	0,3940	0,1863	0,1038	0,1899	0,6600
0,1500	0,4175	0,2079	0,3237	0,0504	0,5788
0,2500	0,4356	0,2217	0,2713	0,0905	0,7034

Ilustración 13. Frontera eficiente de Pareto



5.2. Modelo de regresión seleccionado.

De los modelos de la frontera eficiente de Pareto, el correspondiente a es el de mejor , su función objetivo correspondiente aparece con el segundo mejor , (Ver tabla No. 17), los indicadores de normalidad e independencia y su análisis gráfico de los residuales estandarizados de acuerdo a los gráficos No. 14 y 15, no presenta dudas en cuanto a normalidad e independencia. Por lo tanto se selecciona este modelo, como el ideal que maximiza el rendimiento en el algodón fibra.

Ilustración 14. **Grafica de secuencia residual estandarizados**

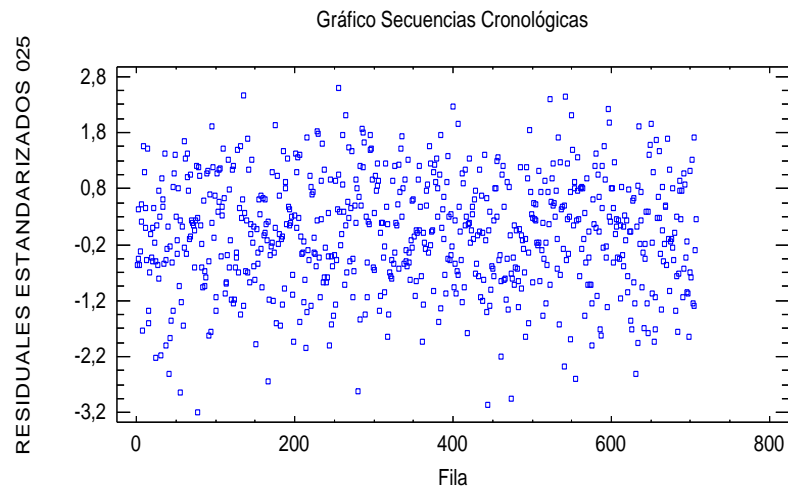
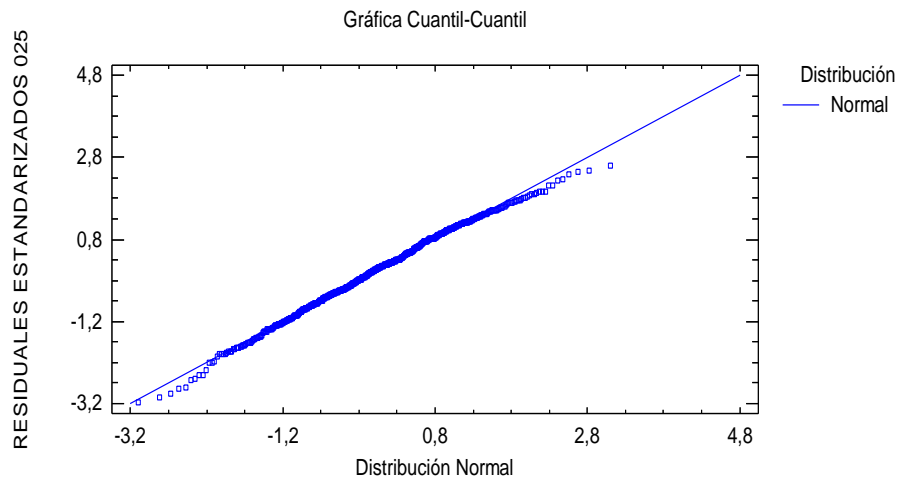


Ilustración 15. **Gráfico de probabilidad normal residuales estandarizados**



Los nueve componentes del modelo ideal seleccionados son:

I

|

El modelo a optimizar es:

SUJETO A:

5.3. Rendimiento y condiciones óptimas de operación bajo el modelo ideal seleccionado.

Seleccionado el modelo ideal para la presente investigación, el paso siguiente es determinar el rendimiento óptimo estimado, y cuáles son las condiciones de entrada y de proceso que maximizan dicho rendimiento. Para lograrlo se implementa el modelo seleccionado, en el software General Algebraic Modelling System (GAMS), bajo las condiciones de un modelo (RMINLP), modelo de programación no lineal entera relajada. El modelo se corre tomando todas las posibles combinaciones de la variables binarias (MEA, MEB, MEC, OPAL, DP164 y M123) y dejando que sea el software quien muestre cuales serían los valores óptimos para las variables enteras (HE, TP y NLF). La tabla No. 18, muestra los resultados arrojados por el software.

Tabla 18. Rendimientos estimados modelo ideal

variables	MEA	MEB	MEC	OPAL	DP164	M123	HE	TP	NLF	Rendimiento máximo estimado para cada combinación de variables
1	1	0	0	1	0	0	12	30	0	42,309
2	0	1	0	0	1	0	12	30	0	40,468
3	0	0	1	0	0	1	12	30	0	44,416
4	0	1	0	0	0	1	12	30	0	44,662
5	1	0	0	0	0	1	12	30	0	45,470
6	0	0	1	1	0	0	12	30	0	41,255
7	0	0	1	0	1	0	12	30	0	40,222
8	0	1	0	1	0	0	12	30	0	41,501
9	1	0	0	0	1	0	12	30	0	41,276

De la información contenida en la tabla No. 18, podemos resaltar los siguientes aspectos.

Para obtener el rendimiento máximo estimado mostrado en la tabla No. 21, se tomaron las combinaciones de la variables binarias (OPAL, DP164, M123, MEA, MEB y MEC), y los valores de HE, TP y NLF, son los arrojados por el software, por lo tanto estas son las condiciones bajo las cuales se obtienen los mejores niveles de rendimiento.

El máximo rendimiento estimado por lote lo arroja la variedad de algodón M123, que ingrese a la desmotadora con el menor nivel de materia extraña (MEA) y el menor grado de humedad (12%), este lote debe ser desmotado con el menor nivel de temperatura 30°C y no se le aplique limpia fibras.

Las condiciones del proceso las cuales son controlables por el técnico de desmote (TP, NLF) se deben mantener en los niveles más bajos (30°C y no aplicar limpia fibras), independientemente del tipo de variedad que llegue a la desmotadora, pero debe llegar con el mínimo nivel de humedad (12%).

5.4. Análisis de los efectos por variables.

En este apartado, se busca medir el efecto que tiene las variables humedad del lote, la temperatura de proceso y el número de limpia fibras aplicadas, sobre el rendimiento máximo estimado.

5.4.1. Efectos del nivel de humedad del lote.

Tabla 19. Efecto de la humedad del lote

VARIEDAD	NIVEL DE MATERIAL EXTRAÑO	HE	TP Arrojada	NFL arrojado por el software	RENDIMIEN TO ESTIMADO	DIFERENCIA
M123	A	6	30	0	51,302	
		8	30	0	49,805	1,4970
		10	30	0	47,752	2,0530
		12	30	0	45,470	2,2820
		14	30	0	43,775	1,6950
		16	30	0	42,747	1,0280
		18	30	0	41,330	1,4170
		20	30	0	38,499	2,8310
	B	6	30	0	50,494	
		8	30	0	48,997	1,4970
		10	30	0	46,944	2,0530
		12	30	0	44,662	2,2820
		14	30	0	42,967	1,6950
		16	30	0	41,939	1,0280
		18	30	0	40,522	1,4170
		20	30	0	37,691	2,8310
	C	6	30	0	50,248	
		8	30	0	48,750	1,498
		10	30	0	46,697	2,053
		12	30	0	44,416	2,281
		14	30	0	42,720	1,696
		16	30	0	41,692	1,028
		18	30	0	40,276	1,416
		20	30	0	37,445	2,831

Para medir el efecto de la humedad del lote en la variable rendimiento, se fijó la variedad del lote (OPAL, DP164 y M123) y el nivel de material extraño (MEA, MEB, MEC), para esto se agregaron 3 niveles más de Humedad en el lote es decir se tomó y la temperatura de proceso y el número de limpia fibras a aplicar son los arrojados por el software.

La tabla No. 19. Indica que si ingresa un lote de algodón semilla de la variedad M123, con nivel de material extraño tipo A, para obtener el rendimiento máximo estimado de 51.302%, debe ingresar a la planta desmotadora con un porcentaje de humedad 6%, el técnico de desmote debe programar la temperatura de la desmotadora en 30° y no aplicar limpia fibras.

No se evidencia una variación clara (aumento o disminución) en el rendimiento cuando se pasa de un nivel de temperatura a otro, por ejemplo la diferencia al pasar de 6% de humedad al 8% en la misma variedad del lote y material extraño es de 1,497%, no es la misma diferencia pasar de 10% al 12% la cual es de 2,053% estos es lógico porque es un modelo no lineal.

5.4.2. Efectos de la temperatura de proceso (TP) en el rendimiento.

Para medir el efecto de la temperatura por lote, se modificara en cada corrida del software el nivel de temperatura considerando los siguientes niveles de TP = 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, y 80°C, 90°C y 100°C, sé adiciona un nivel de menor grado de temperatura aplicada (20°C), para mostrar que a menores niveles de temperatura aplicada, se obtienen mejores rendimientos.

Tabla 20. Efecto de la TP en el rendimiento

VARIEDAD	NIVEL DE MATERIAL EXTRAÑO	HUMEDAD DEL LOTE ARROJADO POR SOTWARE	TP APLICADA	NFL arrojado por el software	RENDIMIENTO ESTIMADO	DIFERENCIA
M123	A	12	20	0	45,940	
		12	30	0	45,470	0,4700
		12	40	0	45,376	0,0940
		12	50	0	45,125	0,2510
		12	60	0	44,750	0,3750
		12	70	0	44,538	0,2120
		12	80	0	44,513	0,0250
		12	90	0	44,514	(0,0010)
		12	100	0	44,387	0,1270
	B	12	20	0	45,131	
		12	30	0	44,662	0,4690
		12	40	0	44,568	0,0940
		12	50	0	44,317	0,2510
		12	60	0	43,942	0,3750
		12	70	0	43,729	0,2130
		12	80	0	43,705	0,0240
		12	90	0	43,706	(0,0010)
		12	100	0	43,579	0,1270
	C	12	20	0	44,885	
		12	30	0	44,416	0,469
		12	40	0	44,321	0,095
		12	50	0	44,070	0,251
		12	60	0	43,696	0,374
		12	70	0	43,483	0,213
		12	80	0	43,459	0,024
		12	90	0	43,460	(0,001)
		12	100	0	43,333	0,127

En la tabla No. 20. Muestra que en la medida que aumentamos la temperatura de procesos en el cuerpo desmotador el rendimiento disminuye y que esta disminución no constante de un nivel a otro dentro de cada una de las combinaciones de Variedad y materia extraña, partiendo de que el lote llega a la desmotadora con niveles mínimos de humedad, esto es natural por es un modelo de regresión no lineal.

5.4.3. Efecto de la aplicación de limpia fibras.

Para cuantificar el efecto de la aplicación de limpia fibras o no durante el proceso de desmote se toman la combinación de las variables binarias y variando el número de limpia fibras aplicados.

Tabla 21 Efecto de Limpia Fibras aplicados

Variedad	Nivel Material extraño	HE Arrojada	TP. Arrojada	Numero limpia fibras	Rendimiento estimado	Diferencia
OPAL	A	12	30	0	42,309	
		12	30	1	41,697	0,612
		12	30	2	41,069	0,628
		12	30	3	40,736	0,333
		12	30	4	40,788	-0,052
		12	30	5	40,612	0,176
		12	30	6	40,028	0,584
	B	12	30	0	41,501	
		12	30	1	40,889	0,612
		12	30	2	40,261	0,628
		12	30	3	39,928	0,333
		12	30	4	39,980	-0,052
		12	30	5	39,803	0,177
		12	30	6	39,219	0,584
	C	12	30	0	41,255	
		12	30	1	40,643	0,612
		12	30	2	40,014	0,629
		12	30	3	39,682	0,332
		12	30	4	39,734	-0,052
		12	30	5	39,557	0,177
		12	30	6	38,973	0,584
DP164	A	12	30	0	41,276	
		12	30	1	40,664	0,612
		12	30	2	40,036	0,628
		12	30	3	39,703	0,333
		12	30	4	39,755	-0,052
		12	30	5	39,578	0,177
		12	30	6	38,994	0,584
	B	12	30	0	40,468	
		12	30	1	39,856	0,612

		12	30	2	39,227	0,629
		12	30	3	38,895	0,332
		12	30	4	38,947	-0,052
		12	30	5	38,770	0,177
		12	30	6	38,186	0,584
	C	12	30	0	40,222	
		12	30	1	39,609	0,613
		12	30	2	38,981	0,628
		12	30	3	38,649	0,332
		12	30	4	38,701	-0,052
		12	30	5	38,524	0,177
		12	30	6	37,940	0,584

Como se puede apreciar en la tabla No. 21, a medida que se le aplica más limpia fibra el rendimiento en fibra disminuye, para cada una de las combinaciones de las variables binarias (OPAL, DP164, M123, MEA, MEB y MEB), partiendo de la base que el lote llegue a la desmotadora con un nivel de humedad bajo, y sea desmotado aplicando bajos niveles de temperatura.

CONCLUSIONES

Con la realización del presente trabajo se puede establecer que una metaheurística híbrida recocido simulado y partícula de enjambre y el concepto de dominancia de Pareto son una excelente herramienta para ajustar y predecir fenómenos cotidianos que incluyen diferentes tipos de variables.

Se ha comprobado que el rendimiento del algodón fibra, en el proceso de desmote es afectado negativamente por cuatro grandes factores: el porcentaje de humedad, con el que llega el lote a la desmotadora, el nivel de suciedad con el que ingresa el lote, los grados de temperatura aplicados en procesos de desmote y la aplicación de limpia fibras

Como el modelo ajustado para pronosticar el rendimiento en el algodón fibra es un modelo de regresión no lineal no se puede establecer con precisión cuál es el aumento o disminución en la variable dependiente al pasar de un nivel a otro de las variables TP, HE y NLF, pero el aumento o disminución en rendimiento dentro de combinaciones de las variables binarias (OPAL, M123 DP164, MEA, MEB, MEC) si es el igual para los mismos niveles de las variables TP, HE y NLF (ver tablas No. 22, 23 y 24).

En resumen para el agricultor obtener óptimos rendimientos debe sembrar variedades de algodón tipo M123, realizar prácticas de recolección que le permitan recoger algodones completamente libres de suciedad o impurezas y que dicha recolección la realice en momentos en que pueda asegurar niveles de Humedad bajos; adicionalmente que la empresa desmotadora aplique temperaturas en el menor nivel permitido y no aplique limpia fibras durante el procesos de desmote.

TRABAJOS FUTUROS

Los ingresos percibidos por el agricultor están explícitos en última instancia por dos elementos: el rendimiento en fibra y las características tecnológicas de calidad en la fibra. La calidad de la fibra es determinada por factores como la longitud, el Micronaire, la Resistencia y el Trash, los cuales son medidos en los laboratorios de las empresas comercializadoras o compradoras de la fibra, estas características tecnológicas de calidad son influenciadas por factores inherentes a condiciones del cultivo y a las del proceso de desmote, una investigación futura en este campo estaría orientada a establecer las condiciones óptimas de cultivo y las de proceso que permitan establecer un equilibrio entre el rendimiento y la calidad en la fibra, y de esta forma el agricultor pueda obtener elevados niveles de ingresos y las empresas desmotadoras ser competitivas y productivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agrocadenas, *La agroindustria del algodón en Colombia: los textiles y las confecciones*, Bogota, Colombia: 2006.
- [2] Hernández Sampieri Roberto; Baptista Lucio pilar y Fernandez Collado Carlos., *Metodología de la investigación*, Bogotá: 2006.
- [3] J.T. C. Wayne Smith, *Cotton: origin, history, technology, and production.*, New York: 1999.
- [4] López Bellido Luis, *Cultivos Industriales*, Madrid, España: 2002.
- [5] Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, *La clasificación del algodón*, Washington, D.C.: 1999.
- [6] Miguel Angel Angulo Luna, "Análisis del Cluster Textil en el Peru," 2004.
- [7] Banco Wiese Sudameris, *Algodón: oferta fragmentada e ineficiente genera baja rentabilidad.*, Lima, Peru: 2005.
- [8] E.C. Sabino, N. P., R. R. Alfonsi, J. I. Kondo, "Efeito de parâmetros climáticos em propriedades tecnológicas da fibra do algodoeiro," CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, vol. 3, 2001, pp. 1064 - 1066.
- [9] M. Mondino, *Efectos del distanciamiento entre surcos y la densidad de plantas sobre el desarrollo, crecimiento y rendimiento de dos variedades de algodón.*, Argentina: 2001.
- [10] a.R. Mcconnell,J.S.; R.C. Kirst,Jr.; R.E. Glover, *Nitrogen fertilization of ultra-narrow row cotton*, Arkansas: 2002.
- [11] M.O. Mondino, *Diferentes criterios de decisión para la aplicación de reguladores de crecimiento y su influencia sobre el rendimiento y el crecimiento del algodón (gossypium hirsutum l.)*, Argentina: 1999.
- [12] P. Sánchez Enrique, Miguel; Segura Castruita, Miguel A. ; Preciado Rangel, Pablo; Orozco Vidal, Jorge A.; Yescas Coronado, *Producción de algodón en doble y triple hilera con riego por goteo sub-superficial*, Universidad Autónoma Chapingo México: 2007.
- [13] G. Holt, *Design of experiments optimization study on the powered roll gin stand*, 2007.

- [14] G. Holt, *Optimization of fiber quality, production rate, and lint turnout for the powered roll gin stand utilizing Response Surface Methodology and desirability functions*, 2004.
- [15] G.A. Backhouse, P G., Fotheringham, A, F. & Allan, *Comparison of a genetic algorithm with an experimental design technique in the optimization of a production process*, 1997.
- [16] V.G. Duli Zhao, K. Raja Reddy, *Remote-sensing algorithms for estimating nitrogen uptake and nitrogen-use efficiency in cotton*, 2010.
- [17] N. Estur, G., & Gergely, *Comparative analysis of organization and performance of African cotton sectors the economics of roller ginning technology and implications for African cotton sectors*, Africa: 2010.
- [18] Richard K. Byler, *ENGINEERING AND GINNING: The Effect of Modest Moisture Addition to Seed Cotton before the Gin Stand on Fiber Length*, 2005.
- [19] V.A. Luis Fernando Escoboza García, Alexis Niebla Aguilar, Roberto Soto Ortiz, Oscar A. Viramontesolivas, Jesús A. Román Calleros, Daniel Araiza Zúñiga, Adolfo Pérez Márquez, Silvia M. Avilésmarín, Angel López López, *Evaluación del rendimiento de algodón (Gossypium hirsutum L) con cuatro niveles de humedad aprovechable en suelo franco en el Valle de Mexicali*, Mexico: 2008.
- [20] Jorge Cadena Torres; Alejandro Agámez, *Pruebas de rendimiento de variedades comerciales de algodón de fibra media*, Cereté, Córdoba: 2003.
- [21] J. Byler, R.K., W.S. Anthony And G.J. Mangialardi, *Improving the HVI strength measurement by adjusting for measured moisture content*, Estados Unidos: 2001.
- [22] S.A. Thomas D. Valco, *Moisture Restoration of Cotton*, USA: 2004.
- [23] Thomas D. Valco, *Improving Efficiency, Reducing Cost at the Gin*, USA: 2009.
- [24] J. Anthony, W.S. and A.C. Griffin, *Fiber breakage at cotton gins: Causes and solutions*, Memphis, TN: 2001.
- [25] T. Valco, *Fiber Quality Aspects of Cotton Ginning*, 2004.

- |
- [26] A.W. Mayfield, W. D., R. V. Baker, *Introduction to a Cotton Gin*, Memphis, Tenn: 1990.
 - [27] A.W. Mayfield, W. D., R. V. Baker, *Introduction to a Cotton Gin*, Memphis, Tenn: 1990.
 - [28] F.U. W. stanley Anthon Y, *The harvesting and ginning of cotton*, USA: 2007.
 - [29] N. Técnica, C.D. Entrega, and P. Desmote, "Algodón con semilla. condiciones de entrega para desmote," 2003.
 - [30] A. Antoniou and W. Sheng Lu, *Practical Optimization. Algorithms and Engineering Applications*, New York: 2007.
 - [31] C.H. Papadimitriou and K. Steiglitz, *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*, New York: .
 - [32] Cortés. D, *Un Sistema Inmune Artificial para resolver el problema del Job Shop Scheduling*, 2004.
 - [33] P.A. Castro and F.J. Zuben, "MOBAIS: A Bayesian Artificial Immune System for Multi-Objective Optimization,," T. ICARIS, Phuket, 7th International Conference, 2008, pp. 48 - 59.
 - [34] A.J. B. Melián, J.A. Pérez, *Metaheuristics: A Global View*, 2003.
 - [35] A.J. A. Duarte, M. Gallego, *Metaheurísticas*, Madrid: 2008.
 - [36] C.D. Kirkpatrick, S., Vecchi, M. P., & Gelat, *Optimization by simulated annealing*, 1983.
 - [37] a.E. N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, *Equation of state calculations by fast computing machines*, 1953.
 - [38] R. Kennedy, J., & Eberhart, *Particle swarm optimization. in proceedings of the 1995, international conference on neural network, perth*, Australia: 1995.
 - [39] Cervantes Rovira Alejandro, "Clasificacion mediante Enjambre de Prototipos," 2009, pp. 31-45.
 - [40] J. Behnamian and S.M. Ghomi, "Expert Systems with Applications Development of a PSO – SA hybrid metaheuristic for a new comprehensive regression model to time-series forecasting," *Expert Systems With Applications*, vol. 37, 2010, pp. 974-984.

- |
- [41] N.G. Álvarez and B.C. Labrín, "Optimización de funciones a través de Optimización por Enjambre de Partículas y Algoritmos Genéticos y," *International Journal*.
 - [42] C.G. Da Silva, *Time-series forecasting with a non-linear model and the scatter search metaheuristic*, 2008.
 - [43] Ramírez González Byron Humberto, *La prueba de Shapiro & Wilk para verificar la normalidad de un conjunto de datos proveniente de muestras pequeñas*, Guatemala: 2006.
 - [44] E. Kerlinger, *Enfoque conceptual de la investigación del comportamiento*, México, D.F: 1979.
 - [45] C.T. Ragsdale and D.R. Plane, "On modeling time series data using spreadsheets," *Omega*, vol. 28, 2000, pp. 215-221.
 - [46] A.M. Brown, "A step-by-step guide to non-linear regression analysis of experimental data using a Microsoft Excel spreadsheet," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 65, 2001, pp. 191- 200.

ENLACES

- [http://byrong.50g.com/estadistica/estadap/shapiro wilks byrong.pdf](http://byrong.50g.com/estadistica/estadap/shapiro%20wilks%20byrong.pdf).
- <http://www.google.com.co/#hl=es&source=hp&q=math.uprm.edu%2F~edgar%2Fcap6sl.ppt>
- <http://www.google.com.co/#hl=es&source=hp&q=math.uprm.edu%2F~edgar%2Fcap6sl.ppt++Puerto+Rico&rlz=1R2RNTNesCO391&aq=f&aql=&aql=&oq=&gsrfai=&fp=38cfb111a5a5fb58>.
- <http://www.socialresearchmethods.net/kb/dummyvar.php>.
- http://spanish.cottoninc.com/MonthlyEconomicLetter_es/#8conomicLetter_es/#8.
- <http://www.diagonal-colombia.com/ClasificacionManual.asp>.
- <http://www.infoagro.com/herbaceos/industriales/algodon.htm>.

|

- <http://www.bayercropscience.com.pe/web/index.aspx?articulo=124>.

Anexo 1. COMPONENTES DE LOS MODELOS DEL FRENTES DE PARETO.

COMPONENTES DEL MODELO PARA CUANDO $\lambda = 1.0$;

|

COMPONENTES DEL MODELO PARA CUANDO $\lambda = 0.9$;

I

|

COMPONENTES DEL MODELO PARA CUANDO $\lambda = 0.6$;

|

COMPONENTES DEL MODELO PARA CUANDO $\lambda = 0.3$;

|

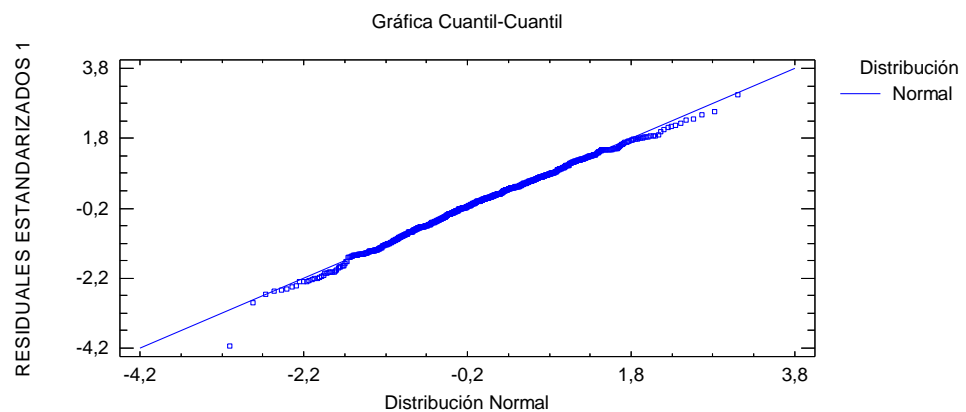
COMPONENTES DEL MODELO PARA CUANDO $\lambda = 0.5$;

|

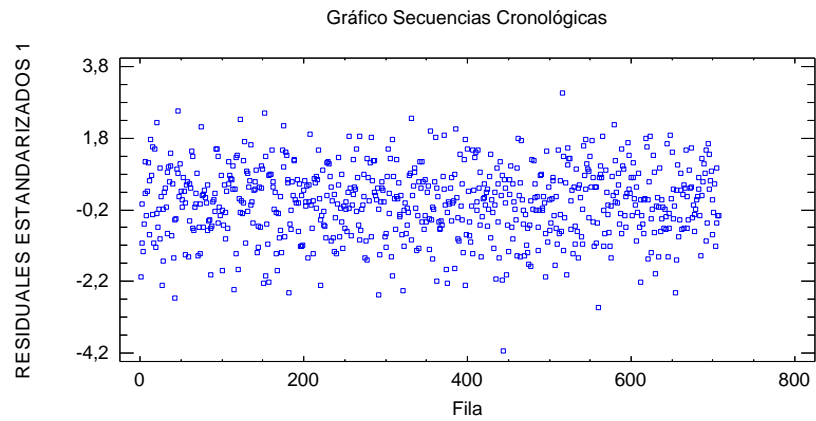
COMPONENTES DEL MODELO PARA CUANDO $\lambda=0.15$;

Anexo 2. ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES ESTANDARIZADOS MODELOS DEL FRENTE DE PARETO.

ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES ESTANDARIZADOS DEL MODELO CUANDO $\lambda = 1.0$.

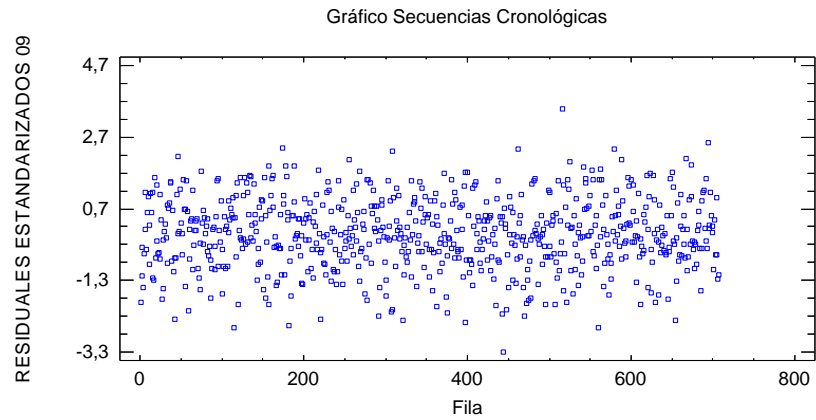
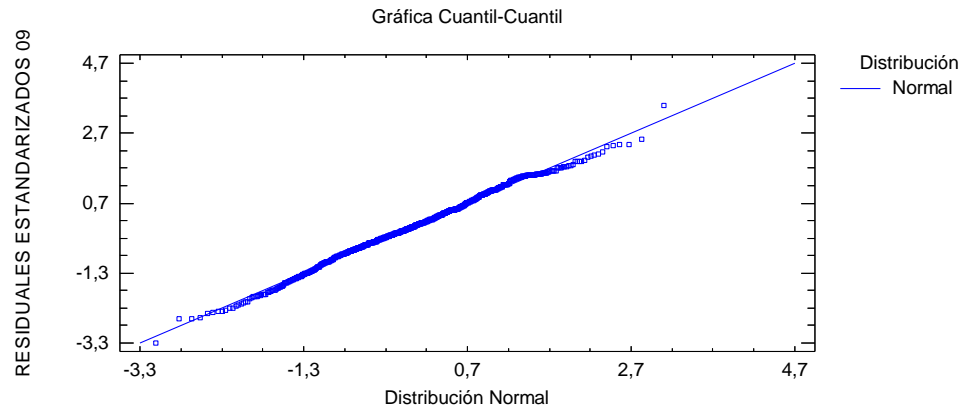


|



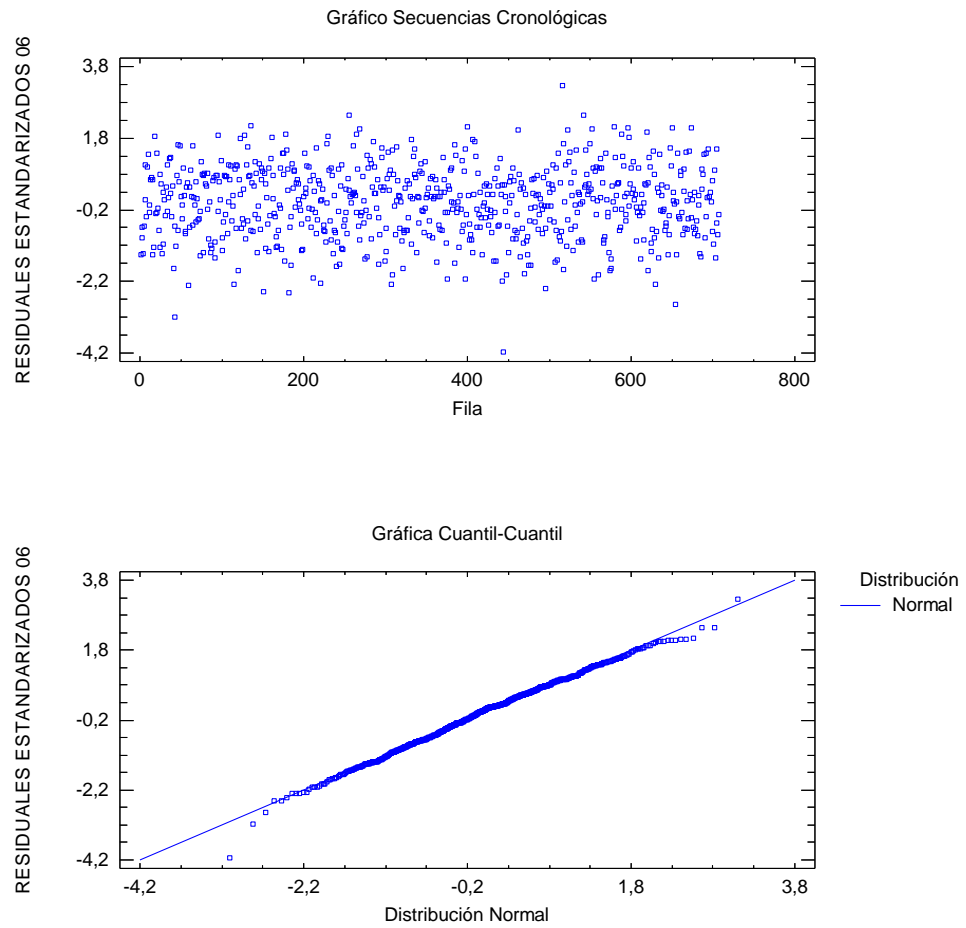
<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Normalidad (Chi-Cuadrado)	0,30288
Normalidad (W de Shapiro-Wilk)	0,875897
Prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov-Smirnov)	0,456146

ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES ESTANDARIZADOS DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.9$.



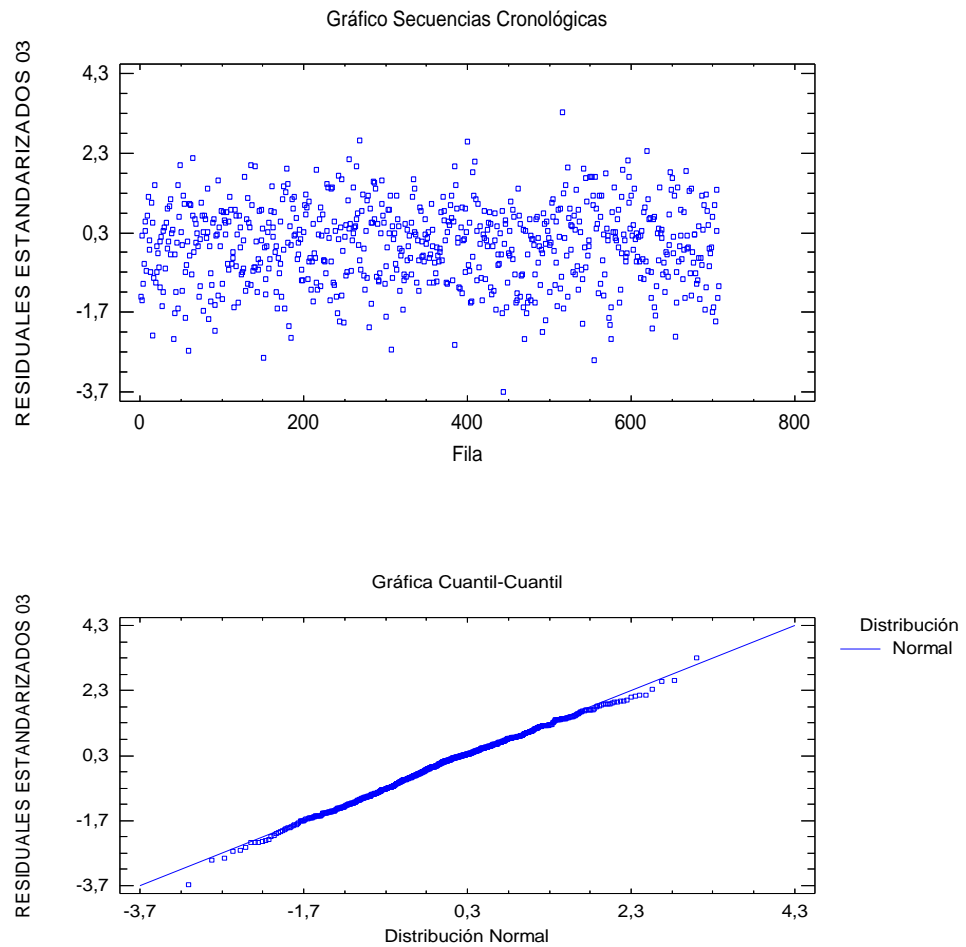
<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Normalidad (Chi-Cuadrado)	0,0134597
Normalidad (W de Shapiro-Wilk)	0,721182
Prueba de bondad de ajuste(Kolmogorov-Smirnov)	0,880785

ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES ESTANDARIZADOS DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.6$.



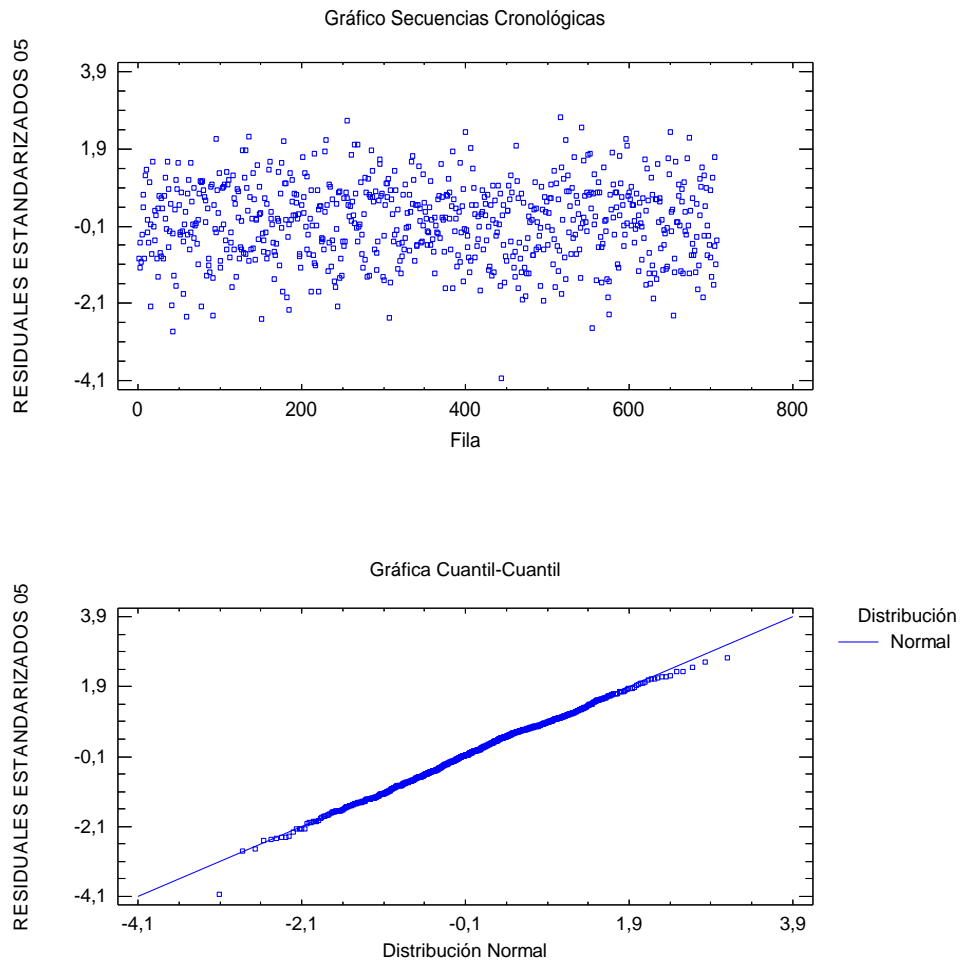
<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Normalidad (Chi-Cuadrado)	0,0509043
Normalidad (W de Shapiro-Wilk)	0,943581
Prueba de bondad de ajuste(Kolmogorov-Smirnov)	0,25298

ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES ESTANDARIZADOS DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.3$.



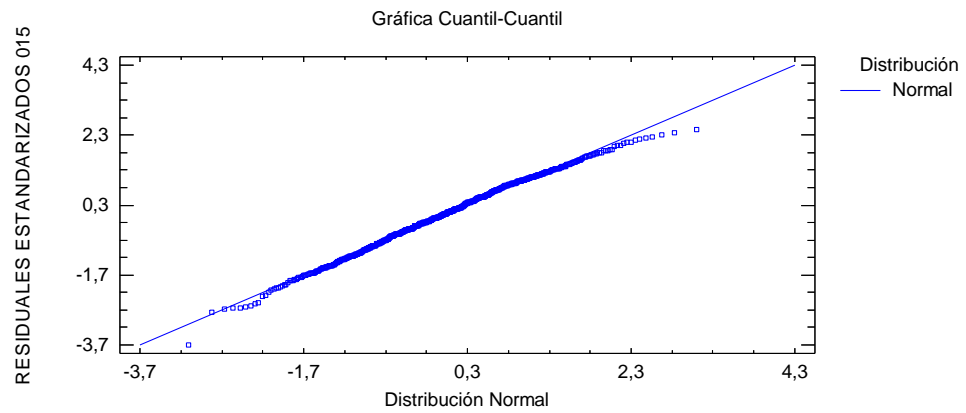
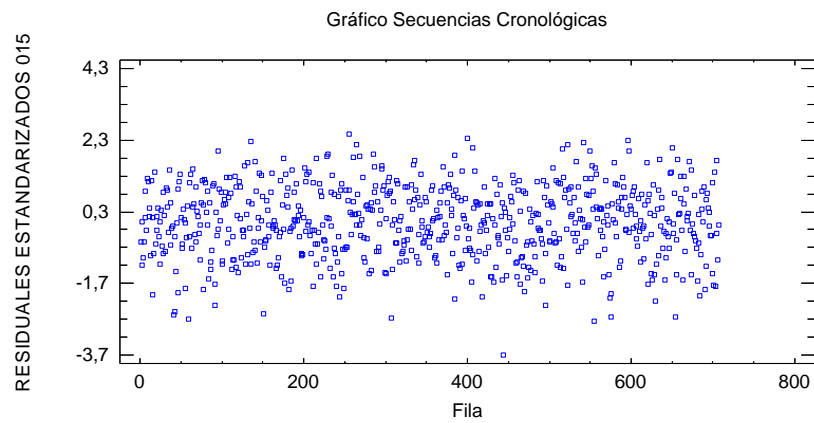
<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Normalidad (Chi-Cuadrado)	0,30288
Normalidad (W de Shapiro-Wilk)	0,818987
Prueba de bondad de ajuste(Kolmogorov-Smirnov)	0,117594

ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES ESTANDARIZADOS DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.5$.



<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Normalidad (Chi-Cuadrado)	0,767157
Normalidad (W de Shapiro-Wilk)	0,655713
Prueba de bondad de ajuste(Kolmogorov-Smirnov)	0,319741

ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD E INDEPENDENCIA DE LOS RESIDUALES ESTANDARIZADOS DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.15$.



<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Normalidad (Chi-Cuadrado)	0,419939
Normalidad (W de Shapiro-Wilk)	0,134175
Prueba de bondad de ajuste(Kolmogorov-Smirnov)	0,601361

Anexo 3. RENDIMIENTO Y CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN BAJO LOS MODELOS DEL FRENTE DE PARETO.

Rendimientos y condiciones de operación óptimas del modelo para cuando $\lambda = 1.0$										
Var.	MEA	MEB	MEC	OPAL	DP164	M123	HE	TP	NLF	RENDIMIENTO. $\lambda = 1.0$
1	1	0	0	1	0	0	12	30	1	39,596
2	0	1	0	0	1	0	12	30	1	39,252
3	0	0	1	0	0	1	12	30	1	39,710
4	0	1	0	0	0	1	12	30	1	39,481
5	1	0	0	0	0	1	12	30	1	39,554
6	0	0	1	1	0	0	12	30	1	39,753
7	0	0	1	0	1	0	12	30	1	39,481
8	0	1	0	1	0	0	12	30	1	39,524
9	1	0	0	0	1	0	12	30	1	39,324
PARÁMETROS DEL MODELO										
Normalidad Shapiro-Wilks										0,0757
Independencia Durbin Watson										0,3713
										-0,0772
										0,1536
Función de optimización										-0,1536

Rendimientos y condiciones de operación óptimas del modelo para cuando $\lambda = 0.9$										
Var.	MEA	MEB	MEC	OPAL	DP164	M123	HE	TP	NLF	RENDIMIENTO. $\lambda = 0.9$
1	1	0	0	1	0	0	12	34	0	41,526
2	0	1	0	0	1	0	12	34	0	41,182
3	0	0	1	0	0	1	12	34	0	41,718
4	0	1	0	0	0	1	12	34	0	41,514
5	1	0	0	0	0	1	12	34	0	41,614
6	0	0	1	1	0	0	12	34	0	41,630
7	0	0	1	0	1	0	12	34	0	41,385
8	0	1	0	1	0	0	12	34	0	41,427
9	1	0	0	0	1	0	12	34	0	41,281
PARÁMETROS DEL MODELO										
Normalidad Shapiro-Wilks										0,2509
Independencia Durbin Watson										0,7349
										0,0303
										0,1640
Función de optimización										-0,1445

Rendimientos y condiciones de operación óptimas del modelo para cuando $\lambda = 0.5$										
Var.	MEA	MEB	MEC	OPAL	DP164	M123	HE	TP	NLF	RENDIMIENTO $\lambda = 0.5$
1	1	0	0	1	0	0	12	98	0	41,026
2	0	1	0	0	1	0	12	98	0	38,248
3	0	0	1	0	0	1	12	98	0	39,365
4	0	1	0	0	0	1	12	98	0	39,133
5	1	0	0	0	0	1	12	98	0	41,684
6	0	0	1	1	0	0	12	98	0	38,707
7	0	0	1	0	1	0	12	98	0	38,479
8	0	1	0	1	0	0	12	98	0	38,475
9	1	0	0	0	1	0	12	98	0	40,799
PARÁMETROS DEL MODELO										
Normalidad Shapiro-Wilks										0,1899
Independencia Durbin Watson										0,6600
										0,3940
										0,1863
Función de optimización										0,1038

Rendimientos y condiciones de operación óptimas del modelo para los valores de λ indicados												
Var.	MEA	MEB	MEC	OPAL	DP164	M123	HE	TP	NLF	REND. $\lambda = 0.15$	REND. $\lambda = 0.30$	REND. $\lambda = 0.60$
1	1	0	0	1	0	0	12	30	0	45,530	50,062	42,934
2	0	1	0	0	1	0	12	30	0	42,790	48,239	41,356
3	0	0	1	0	0	1	12	30	0	42,642	48,714	41,761
4	0	1	0	0	0	1	12	30	0	43,105	48,598	41,661
5	1	0	0	0	0	1	12	30	0	45,479	50,018	42,891
6	0	0	1	1	0	0	12	30	0	43,694	48,758	41,761
7	0	0	1	0	1	0	12	30	0	42,326	48,354	41,455
8	0	1	0	1	0	0	12	30	0	43,157	48,643	41,705
9	1	0	0	0	1	0	12	30	0	45,163	49,658	42,585
PARÁMETROS DEL MODELO												
Normalidad Shapiro-Wilks										0,0504	0,2017	0,0684
Independencia Durbin Watson										0,5788	0,7843	0,5296
										0,4175	0,3857	0,2637
										0,2079	0,1750	0,1669
Función de optimización										0,3237	0,2175	0,0054

Anexo 4. PARÁMETROS POR VARIABLES Y POR MODELO DEL FRENTE DE PARETO.

PARÁMETROS POR VARIABLE DEL MODELO (MODELO SELECCIONADO) CUANDO $\lambda = 0,25$										
K	PARÁMETRO	OPAL	DP164	M123	HE	MEA	MEB	MEC	NLF	TP
-1,436192498	B0	0,142437	0,362615	0,828812	-0,969311	0,266260	-1,000000	0,534426	0,828448	-0,501906
	B1	0,301180	0,823875	0,781719	-0,802239	-0,791098	1,000000	1,000000	0,351616	0,343381
	B2	0,442832	0,499904	-1,000000	0,546555	-0,459641	-0,562740	0,127527	0,152971	0,378107
	B3	0,327419	0,727407	-0,140203	-0,333281	0,537036	-0,472818	0,814115	0,520164	0,694192
	B4	0,070230	0,222252	0,039873	-0,632630	-0,775799	0,488640	0,277229	-0,378288	0,060098
	B5	-0,367197	-0,546885	0,444803	-0,561336	-0,315641	-0,076201	0,123596	-1,000000	-0,071804
	B6	-0,014871	-0,697386	-0,703674	-0,459797	-0,515042	0,870438	-0,016748	-0,008880	0,016943
	B7	-0,872974	-0,989561	0,184118	-0,133773	0,774833	-0,999856	0,390500	0,641810	-0,635868
	B8	0,246134	0,024044	0,226452	0,078319	-0,617690	0,042697	0,121859	-0,157592	-0,342995
	A1	-0,491375	1,000000	-0,246881	-0,079395	-0,454332	0,425283	-0,801508	0,539220	-0,077430
	A2	0,160933	0,790570	-0,145360	-0,420503	0,999808	0,200180	-0,511131	0,763630	-0,079812
	A3	0,552153	-0,367631	0,870223	0,089932	0,269722	0,861479	0,871595	-0,255282	0,519348
	A4	-0,696829	0,897240	-0,089287	0,283049	-0,798124	0,234385	0,546496	0,228594	-0,003752
	A5	-0,283082	-0,597237	-0,659538	0,707595	-0,767107	0,290066	-0,389867	-0,686980	0,675596
	A6	0,040039	-1,000000	0,935981	-0,070206	0,281302	0,018642	0,158900	-0,804610	-0,232337
	A7	0,084150	-0,165545	0,325390	0,596294	-0,040809	0,336467	-0,014263	0,328118	-0,633236
	A8	-0,546473	-0,262599	0,105899	-0,390689	0,846144	0,178219	-0,252858	0,042365	-0,492349
	C1	-0,418790	0,195630	-0,077406	-0,686044	-0,112388	-0,075583	0,115507	-0,101071	0,303674
	C2	-0,505841	0,360867	-0,000671	-0,055951	-0,242470	-1,000000	0,644301	-0,132442	-0,206006
	C3	0,429498	-0,531181	0,368672	-0,097875	-0,273460	0,132480	0,286534	-0,512318	0,048356

PARÁMETROS POR VARIABLE DEL MODELO CUANDO $\lambda = 1.0$										
K	PARÁMETROS	OPAL	DP164	M123	HE	MEA	MEB	MEC	NLF	TP
-0,48079057	B0	0,261515	0,461479	0,947860	-0,863747	0,365425	-0,775590	0,620001	0,924860	-0,610466
	B1	0,231033	0,922893	0,873518	-0,899187	-0,889833	0,994235	0,824817	0,449650	0,799278
	B2	0,988010	0,106327	-1,241324	0,645501	-0,465503	-0,661202	0,140737	0,293363	0,476605
	B3	0,131390	0,827964	-0,234371	-0,432040	0,637179	-0,571345	0,749788	0,583541	1,408895
	B4	0,170582	0,063168	-0,089479	-0,364356	-0,874782	0,587602	0,374838	-0,321280	0,335714
	B5	-0,464530	-0,644873	0,543793	-0,458378	-0,234166	-0,174222	0,025105	-0,010821	-0,124519
	B6	0,082819	-0,616427	-0,756660	-0,944187	-0,053379	0,835125	0,151302	-0,107366	-0,071575
	B7	-0,689543	-0,404826	0,086063	-0,144933	0,873805	-0,985387	0,489241	0,739427	-0,787268
	B8	0,345134	-0,079062	0,283769	0,006869	-0,715740	-0,285398	0,220487	-0,256331	-0,395678
	A1	-0,336847	2,855780	-0,353030	0,005517	-0,559336	0,523317	-0,883723	0,637690	-0,289229
	A2	0,259935	0,881613	-0,244101	-0,517409	0,980573	0,105763	-0,407247	0,862348	-0,129587
	A3	0,655251	-0,940272	1,283019	0,919631	0,367917	0,544013	2,548373	-0,353571	0,604508
	A4	-0,794753	1,002819	0,008734	0,257958	-0,739743	0,567789	0,448021	0,130543	0,101370
	A5	-0,935542	-0,589501	-0,363224	0,806376	-0,863055	0,661813	-0,351837	-0,643051	0,774549
	A6	-0,079088	-3,439874	0,847016	0,030748	0,379289	-0,134411	0,239543	-0,894801	-1,342519
	A7	0,182245	-0,262258	0,742461	0,693944	0,044423	0,298109	0,571562	0,426596	-0,690550
	A8	-0,553605	-0,361060	0,026429	-0,420414	0,938936	0,147252	-0,357177	0,140869	-0,317234
	C1	-0,517745	0,306295	-0,051224	-0,793253	-0,013433	-0,453453	0,116235	-0,002582	0,402142
	C2	-0,561044	0,459823	-0,099562	-0,160922	-0,143994	-1,151585	1,463226	-0,033961	-0,094215
	C3	0,482822	-0,629639	0,315128	-0,195917	-0,199554	0,035340	0,401289	-0,611264	-0,021297

|

PARÁMETROS POR VARIABLE DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.9$										
K	PARÁMETROS	OPAL	DP164	M123	HE	MEA	MEB	MEC	NLF	TP
-0,4896510	B0	0,261515	0,461479	0,947860	-0,863747	0,365425	-0,775590	0,620001	0,924860	-0,610466
	B1	0,231033	0,922893	0,873518	-0,899187	-0,889833	0,994235	0,824817	0,449650	0,799278
	B2	0,541427	0,106327	-0,766489	0,645501	-0,557643	-0,661202	0,140737	0,194855	0,476605
	B3	0,432456	0,827964	-0,234371	-0,432040	0,319557	-0,571345	0,749788	0,583541	0,792326
	B4	0,170582	0,128477	-0,065460	-0,364356	-0,874782	0,587602	0,374838	-0,627397	0,335714
	B5	-0,464530	-0,644873	0,543793	-0,666810	-0,234166	-0,174222	0,025105	-1,108574	-0,084473
	B6	0,082819	-0,616427	-0,756660	-0,944187	-0,053379	0,799734	0,151302	-0,107366	-0,071575
	B7	-0,689543	-0,940988	0,086063	-0,182083	0,873805	-0,985387	0,489241	0,739427	-0,787268
	B8	0,345134	-0,079062	0,283769	0,006869	-0,715740	-0,285398	0,220487	-0,256331	-0,014071
	A1	-0,578322	1,543441	-0,353030	0,005517	-0,559336	0,523317	-0,883723	0,637690	-0,289229
	A2	0,259935	0,881613	-0,244101	-0,517409	0,980573	0,105763	-0,609120	0,862348	-0,080040
	A3	0,655251	-0,940272	0,966514	0,919631	0,367917	0,544013	2,548373	-0,353571	0,604508
	A4	-0,794753	1,002819	0,008734	0,257958	-0,739743	0,567789	0,448021	0,130543	0,101370
	A5	-0,935542	-0,589501	-0,363224	0,806376	-0,863055	0,661813	-0,351837	-0,544267	0,774549
	A6	-0,079088	-3,439874	0,847016	0,030748	0,379289	-0,079616	0,277842	-0,894801	-1,342519
	A7	0,182245	-0,262258	0,742461	0,410610	0,044423	0,298109	0,571562	0,426596	-0,690550
	A8	-0,553605	-0,337855	0,007838	-0,420414	0,938936	0,147252	-0,357177	0,140869	-0,455199
	C1	-0,517745	0,306295	-0,051224	-0,793253	-0,013433	-0,453453	0,220341	-0,002582	0,402142
	C2	-0,561044	0,459823	-0,099562	-0,160922	-0,143994	-1,151585	0,743393	-0,033961	-0,094215
	C3	0,963611	-0,629639	0,315128	-0,195917	-0,199554	0,035340	0,401289	-0,611264	-0,049635

PARÁMETROS POR VARIABLE DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.6$										
K	PARÁMETROS	OPAL	DP164	M123	HE	MEA	MEB	MEC	NLF	TP
-0,478499	<i>B0</i>	0,147164	0,466552	0,954582	-0,842328	0,342741	-0,750117	0,594208	0,944341	-0,632203
	<i>B1</i>	0,377152	0,931206	0,882721	-0,922798	-0,864231	0,991329	0,809819	0,539421	0,565398
	<i>B2</i>	0,521478	0,623340	-1,000000	0,654370	-0,560355	-0,684277	0,094429	0,271052	0,461860
	<i>B3</i>	0,454149	0,804879	-0,214790	-0,410026	0,294663	-0,555931	0,823910	0,604196	0,767067
	<i>B4</i>	0,150996	0,152473	-0,074267	-0,658010	-0,868260	0,563283	0,355558	-0,326409	0,124348
	<i>B5</i>	-0,248687	-0,665798	0,519830	-0,641161	-0,247284	-0,154837	0,049884	-1,000000	-0,109238
	<i>B6</i>	0,105310	-0,592980	-0,753268	-0,540635	-0,588234	0,971184	0,066706	-0,089187	-0,059632
	<i>B7</i>	-0,973804	-0,270148	0,109580	-0,162361	0,851057	-0,982328	0,469153	0,717912	-0,712793
	<i>B8</i>	0,319955	-0,101844	0,318217	0,003004	-0,706899	-0,309115	0,242779	-0,233570	-0,377367
	<i>A1</i>	-0,558810	1,000000	-0,377253	0,027570	-0,584047	0,528243	-0,859514	0,654295	-0,161584
	<i>A2</i>	0,496220	0,316125	-0,219713	-0,497057	0,980195	0,127751	-0,592349	0,857075	-0,093337
	<i>A3</i>	0,642559	-0,460098	0,953499	0,174765	0,355730	0,947506	1,000000	-0,328782	0,628170
	<i>A4</i>	-0,775965	1,000000	0,049148	0,354702	-0,720684	0,741826	0,447764	0,111790	0,124955
	<i>A5</i>	-0,475419	-0,564121	-0,563800	0,786963	-0,840218	0,389119	-0,330066	-0,586244	0,759129
	<i>A6</i>	-0,102033	-1,000000	0,825884	0,049608	0,357222	-0,056780	0,300341	-0,917092	-0,305860
	<i>A7</i>	0,186682	-0,284458	0,391398	0,712401	0,024802	0,277151	0,550489	0,419640	-0,676711
	<i>A8</i>	-0,618272	-0,335817	-0,017953	-0,465187	0,946420	0,258780	-0,344162	0,246589	-0,611953
	<i>C1</i>	-0,716865	0,330297	-0,037765	-0,771449	-0,032917	-0,476503	0,235265	0,002270	0,383146
	<i>C2</i>	-0,565780	0,446197	-0,113168	-0,170738	-0,122176	-0,642586	0,720416	-0,040929	-0,102887
	<i>C3</i>	0,468405	-0,616815	0,291119	-0,215043	-0,212351	0,037025	0,388893	-0,633763	-0,047550

PARÁMETROS POR VARIABLE DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.3$										
K	PARÁMETROS	OPAL	DP164	M123	HE	MEA	MEB	MEC	NLF	TP
-0,5523659	<i>B0</i>	0,216823	0,514899	0,901205	-0,820390	0,306296	-1,000000	0,556966	0,860050	-0,557187
	<i>B1</i>	0,373763	0,858788	0,809137	-0,835010	-0,829664	1,000000	1,000000	0,390934	0,415496
	<i>B2</i>	0,513950	0,533529	-1,000000	0,585505	-0,494187	-0,692863	0,018698	0,193995	0,444235
	<i>B3</i>	0,393711	0,886974	-0,182724	-0,364886	0,577523	-0,515542	0,665040	0,561988	0,726949
	<i>B4</i>	0,115905	0,170276	-0,100380	-0,615248	-0,925794	0,522942	0,310762	-0,392711	0,182890
	<i>B5</i>	-0,473751	-0,585636	0,484987	-0,602482	-0,274819	-0,237647	-0,005861	-1,000000	-0,125244
	<i>B6</i>	0,018071	-0,615223	-0,697679	-0,520930	-0,550057	0,913033	0,017165	-0,057505	-0,017054
	<i>B7</i>	-0,942250	-0,876552	0,020859	-0,247979	0,801883	-0,936566	0,462066	0,684746	-0,669707
	<i>B8</i>	0,409153	-0,125027	0,298328	-0,029680	-0,650677	-0,023107	0,160597	-0,282109	-0,428367
	<i>A1</i>	-0,546062	1,000000	-0,294474	-0,011647	-0,506099	0,491093	-0,851338	0,572010	-0,240230
	<i>A2</i>	0,235522	0,816007	-0,296163	-0,484585	0,910506	0,035251	-0,544348	0,798607	-0,102131
	<i>A3</i>	0,589568	-0,402761	0,973651	0,117184	0,396233	0,894094	0,917475	-0,293645	0,540442
	<i>A4</i>	-0,734617	1,000000	-0,029801	0,316649	-0,715094	0,388888	0,502891	0,098683	0,164981
	<i>A5</i>	-0,665736	-0,659961	-0,527034	0,850888	-0,797381	0,367971	-0,335611	-0,572194	0,742030
	<i>A6</i>	-0,046382	-1,000000	0,781875	0,034331	0,444443	-0,144764	0,213711	-0,829578	-0,390365
	<i>A7</i>	0,220564	-0,315006	0,348674	0,634677	0,104645	0,353995	0,024780	0,365857	-0,637556
	<i>A8</i>	-0,584684	-0,329256	-0,060011	-0,433655	0,923235	0,217061	-0,324958	0,205213	-0,391186
	<i>C1</i>	-0,453309	0,247214	-0,077012	-0,727574	-0,078317	0,035205	0,256841	0,023066	0,337345
	<i>C2</i>	-0,507691	0,398720	-0,040598	-0,155597	-0,135432	-1,000000	0,683159	-0,066165	-0,163282
	<i>C3</i>	0,419215	-0,570871	0,374502	-0,165159	-0,302169	0,295337	0,412772	-0,546364	0,010078

|

PARÁMETROS POR VARIABLE DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.5$										
K	PARÁMETROS	OPAL	DP164	M123	HE	MEA	MEB	MEC	NLF	TP
-0,366331747	<i>B0</i>	0,236956	0,476417	0,960854	-0,877458	0,274562	-1,000000	0,604947	0,992285	-0,698950
	<i>B1</i>	0,402375	0,929326	0,922370	-0,885471	-0,903064	1,000000	1,000000	0,462337	0,445723
	<i>B2</i>	0,506189	0,597067	-1,000000	0,670587	-0,647795	-0,571493	0,077436	0,257107	0,478977
	<i>B3</i>	0,454555	0,839922	-0,235825	-0,446308	0,646283	-0,587766	0,809893	0,616766	0,791151
	<i>B4</i>	0,168446	0,141010	-0,059490	-0,642037	-0,785203	0,549616	0,382397	-0,310096	0,105096
	<i>B5</i>	-0,485952	-0,555953	0,602472	-0,580968	-0,226716	-0,172769	0,024088	-1,000000	-0,108469
	<i>B6</i>	0,076168	-0,605120	-0,747577	-0,554610	-0,597600	0,883337	0,068088	-0,099353	-0,075762
	<i>B7</i>	-0,983884	-0,635418	0,098316	-0,196950	0,963770	-0,986613	0,503756	0,754288	-0,738350
	<i>B8</i>	0,364950	-0,042527	0,337319	-0,083597	-0,727617	-0,038868	0,245402	-0,251016	-0,385944
	<i>A1</i>	-0,562627	1,000000	-0,378499	0,010846	-0,560510	0,530664	-0,792902	0,728079	-0,175007
	<i>A2</i>	0,270182	0,913055	-0,260295	-0,529504	0,954017	0,098490	-0,482309	0,845448	-0,163812
	<i>A3</i>	0,643159	-0,481429	0,954263	0,151315	0,368021	0,903635	0,921241	-0,316894	0,608269
	<i>A4</i>	-0,740498	1,000000	0,014318	0,382587	-0,729367	0,422177	0,452251	0,185942	0,122686
	<i>A5</i>	-0,726209	-0,590392	-0,570558	0,822619	-0,889342	0,442571	-0,341024	-0,603503	0,747159
	<i>A6</i>	-0,139138	-1,000000	0,756881	0,016777	0,364116	-0,073652	0,292693	-0,907060	-0,344501
	<i>A7</i>	0,212989	-0,353270	0,422573	0,697985	0,059579	0,281814	0,078668	0,418152	-0,691450
	<i>A8</i>	-0,640503	-0,379178	-0,024758	-0,484752	0,948347	0,240173	-0,330042	0,124707	-0,400930
	<i>C1</i>	-0,534933	0,321043	-0,055370	-0,807141	-0,104462	-0,015475	0,232511	0,013216	0,492378
	<i>C2</i>	-0,545501	0,468807	-0,012406	-0,169993	-0,155380	-1,000000	0,748757	-0,044334	-0,118859
	<i>C3</i>	0,467399	-0,625577	0,337886	-0,198726	-0,365632	0,321415	0,369637	-0,635871	-0,112144

|

PARÁMETROS POR VARIABLE DEL MODELO CUANDO $\lambda = 0.15$										
K	PARÁMETROS	OPAL	DP164	M123	HE	MEA	MEB	MEC	NLF	TP
-0,52404728	B0	0,277723	0,498559	0,910635	-0,900782	0,335250	-1,000000	0,582866	0,961874	-0,573368
	B1	0,395425	0,885861	0,910730	-0,861991	-0,852625	1,000000	1,000000	0,564661	0,411181
	B2	0,693351	0,560773	-1,000000	0,608487	-0,595323	-0,623996	0,116579	0,204791	0,439545
	B3	0,469628	0,791087	-0,271384	-0,469065	0,599974	-0,534205	0,766221	0,582062	0,755185
	B4	0,141729	0,165528	-0,102673	-0,709541	-0,837553	0,550447	0,337644	-0,358500	0,148747
	B5	-0,427228	-0,607649	0,506709	-0,629599	-0,196962	-0,211384	0,062060	-0,605627	-0,161098
	B6	0,085231	-0,653280	-0,793617	-0,590559	-0,576596	0,999801	0,118828	-0,070155	-0,118093
	B7	-0,938772	-0,920953	0,048957	-0,293072	0,836788	-0,322416	0,452284	0,381863	-0,770674
	B8	0,382383	-0,041821	0,320790	-0,034633	-0,678721	-0,018038	0,257699	0,013840	-0,432738
	A1	-0,541326	1,000000	-0,315740	-0,031698	-0,596482	0,486193	-0,846519	0,601032	-0,213091
	A2	0,222833	0,918660	-0,404003	-0,554407	0,997152	0,142908	-0,646213	0,829895	-0,117114
	A3	0,618037	-0,505070	0,944706	0,187132	0,404937	0,921526	0,955608	-0,316359	0,604125
	A4	-0,794654	0,573927	0,046072	0,340348	-0,702538	0,370196	0,484907	0,167736	0,073481
	A5	-0,340643	-0,728349	-0,549238	0,769167	-0,825816	0,372303	-0,314631	-0,567461	0,737476
	A6	-0,116321	-1,000000	0,884268	0,067701	0,416499	-0,079635	0,240799	-0,931775	-0,293669
	A7	0,145180	-0,299324	0,451278	0,656837	0,081376	0,335397	0,121789	0,389305	-0,653340
	A8	-0,604089	-0,324270	-0,033195	-0,452196	0,901965	0,277717	-0,394201	0,103893	-0,553214
	C1	-0,480623	0,343433	-0,014111	-0,756050	-0,050462	0,020746	0,183147	0,034660	0,439128
	C2	-0,523839	0,422802	-0,136538	-0,161549	-0,106966	-1,000000	0,780598	-0,070993	-0,131424
	C3	0,445750	-0,592400	0,352332	-0,166941	-0,336070	0,205461	0,421519	-0,640874	-0,012366